

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE

PARIS - GRIGNON

**Centre de Coopération Internationale
en Recherche Agronomique
pour le Développement**

département
Systèmes Agro-alimentaires et Ruraux

THESE

présentée par

Jean - Marie PAILLAT

Ingénieur Agricole

I.S.A. Beauvais

Ingénieur de recherche **C.I.R.A.D. - S.A.R.**

pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Institut National Agronomique Paris - Grignon

Etude de l'ensilage en balles enrubannées sous climat tropical d'altitude

Cas des fourrages tempérés et tropicaux récoltés à l'île de La Réunion

soutenue le **23 juin 1995**

devant le jury composé de :

Mr. AUBINEAU	Professeur émérite I.N.A.-PG, directeur de thèse	Président
Mr. BLANCHART	Professeur I.U.T. de Nancy	Rapporteur
Mr. CABON	Ingénieur de recherche I.T.C.F.	Examineur
Mr. DEMARQUILLY	Directeur de recherche I.N.R.A.	Examineur
Mr. GAILLARD	Ingénieur de recherche CEMAGREF	Examineur
Mr. GOUET	Directeur de recherche I.N.R.A.	Rapporteur
Mr. TOUTAIN	Directeur de programme C.I.R.A.D.-E.M.V.T.	Examineur

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE

PARIS - GRIGNON

**Centre de Coopération Internationale
en Recherche Agronomique
pour le Développement**

département
Systèmes Agro-alimentaires et Ruraux

THESE

présentée par **Jean - Marie PAILLAT**

Ingénieur Agricole **I.S.A. Beauvais**
Ingénieur de recherche **C.I.R.A.D. - S.A.R.**

pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Institut National Agronomique Paris - Grignon

Etude de l'ensilage en balles enrubannées sous climat tropical d'altitude

Cas des fourrages tempérés et tropicaux récoltés à l'île de La Réunion

soutenue le **23 juin 1995**

devant le jury composé de :

Mr. AUBINEAU	Professeur émérite I.N.A.-PG, directeur de thèse	Président
Mr. BLANCHART	Professeur I.U.T. de Nancy	Rapporteur
Mr. CABON	Ingénieur de recherche I.T.C.F.	Examineur
Mr. DEMARQUILLY	Directeur de recherche I.N.R.A.	Examineur
Mr. GAILLARD	Ingénieur de recherche CEMAGREF	Examineur
Mr. GOUET	Directeur de recherche I.N.R.A.	Rapporteur
Mr. TOUTAIN	Directeur de programme C.I.R.A.D.-E.M.V.T.	Examineur

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé entièrement à La Réunion au C.I.R.A.D., et surtout chez des éleveurs, avec leur concours et celui des techniciens des organismes de développement, ainsi que des entrepreneurs de travaux agricoles. Je voudrais ici exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette thèse.

Je souhaite tout d'abord remercier vivement Monsieur le Professeur Michel Aubineau, responsable de la Chaire de Machinisme agricole de l'I.N.A. - P.G., qui a accepté de diriger ces travaux, en m'apportant ses conseils avisés pour l'expression des résultats et la rédaction, et en m'accordant une grande liberté dans le choix des thèmes de recherche.

Mes remerciements vont également à MM. Camille Demarquilly, directeur de recherche à l'I.N.R.A. de Theix et François Gaillard, ingénieur de recherche au CEMAGREF de Montoldre, pour l'appui permanent qu'ils m'ont accordé, tant dans l'orientation de mes recherches, dans la conduite des expérimentations, dans la discussion des résultats que dans la rédaction. Leurs conseils scientifiques ont été pour moi particulièrement précieux. Je remercie aussi MM. Blanchart, Cabon, Gouet et Toutain pour leur participation en qualité de membres du jury.

J'exprime ma reconnaissance envers les responsables du département : au C.E.E.M.A.T. tout d'abord, avec les encouragements pour le démarrage de la thèse de Marc Le Moigne, actuellement directeur du département S.A.R., Francis Troude, Roland Pirot et Alain Ducreux, au C.I.R.A.D. - S.A.R. ensuite, avec le soutien de l'unité G.A.M. et de mon chef de programme Bernard Dolacinski. Enfin, j'ai pu bénéficier de l'intérêt des délégués du C.I.R.A.D. à La Réunion : Jean Servant, Michel Hoareau, Yves Bertin et Paul Gener.

Mes remerciements s'adressent aussi à ceux qui ont permis la réalisation de cette thèse grâce à l'octroi de soutiens financiers : le C.I.R.A.D. - S.A.R., tout d'abord, pour salaires et fonctionnement du programme de recherche, la Région Réunion pour sa participation au fonctionnement et pour le financement des projets d'ensilage en balles enrubannées, et enfin la C.O.R.D.E.T. (Ministère des D.O.M. - T.O.M.) pour les crédits incitatifs qui ont permis le démarrage de ces actions de recherche nouvelles.

De nombreuses personnes m'ont aidé dans la mise en place des expérimentations. J'exprime ma gratitude envers Alex Michon, directeur de l'Union des A.F.P., avec qui le dialogue a été permanent et qui a constitué le relai essentiel avec la Région Réunion. Jacques Lepetit, puis Vladimir Barbet-Massin (techniciens à l'Union des A.F.P.) ont été pour moi des collaborateurs toujours disponibles pour la réalisation des essais chez les éleveurs, ainsi que Frédéric Fontaine (technicien à l'E.D.E.) et Roger Barnetche (technicien au C.E.E.M.A.T.), je les remercie chaleureusement. François Munier et Christian Rochetaing (techniciens à l'E.D.E.) ont également participé aux essais.

Remerciements

Dans ces remerciements, je n'oublie pas tous les éleveurs qui m'ont permis de suivre les chantiers d'ensilage et de réaliser les prélèvements nécessaires aux analyses, plus spécialement Pierre Marianne (Plaine des Palmistes), Jean-Michel Picard et Frantz Sanassama (Plaine des Cafres), et la S.I.C.A. - Lait pour l'appui de son président (Morille Maillot), de son directeur (Yves Evenat), de ses techniciens (Eric Guérard, Eric Marianne, René-Claude Boyer, Laurent Vion) et de ses ouvriers. Ma reconnaissance va également à Jacky Morel, entrepreneur de travaux agricoles, et son équipe, pour sa compréhension et son efficacité lors de la réalisation des essais.

Les dispositifs expérimentaux ont été réalisés au C.I.R.A.D. grâce aux compétences et à la disponibilité de Lilian Gauvin, Bernard Gauvin et Floris Mouniapin ; je leur exprime ici ma reconnaissance, ainsi qu'à Patrick Légier (responsable du laboratoire d'analyses) pour la conception et le montage de la chaîne de mesures et pour l'efficacité et le sérieux dont fait preuve toute son équipe au laboratoire, spécialement Dolin Mouny-Latchimy et Jocelyn Idmond. Ma gratitude va également à Frédéric Demarne pour la mise au point de la chromatographie.

Pour la lecture des textes, les corrections et conseils de rédaction apportés, je remercie, bien sûr MM. Aubineau, Demarquilly et Gaillard, mais aussi tout particulièrement Jean-Marc Chastel (agro-économiste), Philippe Hassoun (zootechnicien) et Sylvain Perret (agropédologue) travaillant au C.I.R.A.D. à La Réunion, et également Philippe Jannot (CEMAGREF d'Antony), Roland Piro et Michel Havard (C.I.R.A.D. - S.A.R. de Montpellier). Je tiens à remercier également Danièle Blary pour les traductions des communications aux congrès.

J'exprime ma gratitude à Michel Passouant (C.I.R.A.D. - S.A.R. de Montpellier) ainsi qu'à Grégoire Vincent (thésard au C.I.R.A.D. Réunion) pour leur appui en biométrie et en statistiques. Les stagiaires (Laurent Desvals, Jean-Charles Dhuin et Eric Singainy), qui ont participé au programme de recherche sur l'ensilage en balles enrubannées, ont pu m'apporter leurs compétences respectives, je les en remercie.

Enfin, j'exprime mon amitié à tous ceux avec qui j'ai eu le plaisir de travailler durant la réalisation de cette thèse :

- Josie Carpanin, avec sa disponibilité quotidienne et son efficacité,
- mes collègues du C.I.R.A.D. - S.A.R. : Jean-Cyril Dagallier, Dany Deurveillher, Alain Ducreux (responsable exécutif), Sylvain Perret, Bernard Siegmund,
- mes collègues de l'équipe C.I.R.A.D. Elevage : Charles-Emile Bigot, Vincent Blanford, Olivia Fontaine, Philippe Hassoun, Frédéric Lanot, Gilles Mandret (coordinateur de l'équipe), mais aussi Philippe Brunschwig et Jean Pelot tous deux de retour en métropole.

En m'excusant sincèrement pour ceux que j'aurais oubliés dans ces remerciements, je souhaite tout simplement dire merci à Hélène, qui malgré l'engagement dans son propre travail de thèse, a su faire preuve de patience, d'efficacité au quotidien, en m'assurant un soutien de chaque instant ; merci aussi à Samuel, Jean et Louise et excusez-moi pour mes absences.

Sommaire

REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	5
PRESENTATION GENERALE	13
CARTE HYPSONOMETRIQUE	14
INTRODUCTION	15
1. Développement de l'élevage bovin à partir des systèmes herbagers dans les Hauts de l'île	15
2. Recherche en partenariat - expérimentations chez les éleveurs	16
3. Hypothèses et objectifs de recherche	18
PLANCHE DES PHOTOS 1 ET 2	20
CONTEXTE LOCAL DE L'ETUDE	21
1. La Réunion : un milieu physique difficile	21
CARTE DE LA PLUVIOMETRIE	22
2. L'élevage bovin : rôle dans l'aménagement des Hauts	23
CARTE DE LA VEGETATION	24
3. Une production fourragère déficitaire en saison sèche	27
4. Environnement socio-économique des éleveurs	28
LA RECOLTE DES FOURRAGES EN ENSILAGE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	29
1. Principe de l'ensilage et techniques de récolte	29
2. Aptitude des fourrages à l'ensilage	30
2.1. Teneur en glucides solubles	31
2.2. Pouvoir tampon	31
2.3. Teneur en matière sèche	32
3. Transformations biochimiques en cours de conservation	32
3.1. Activité enzymatique	32
3.1.1. Respiration	33
3.1.2. Hydrolyse des glucides solubles	33
3.1.3. Protéolyse	33
3.1.4. Action sur les acides organiques	34
3.2. Phase de fermentation	34
3.2.1. Flore présente sur le fourrage	34
3.2.2. Bactéries aérobies et coliformes	34
3.2.3. Bactéries lactiques	35
3.2.4. Bactéries butyriques saccharolytiques	36
3.2.5. Bactéries butyriques protéolytiques	37

3.2.6. Autres micro-organismes	37
3.2.7. Cinétique du développement bactérien dans les ensilages	37
3.3. Phase post-fermentaire	38
4. Facteurs influençant les fermentations	39
4.1. Facteurs liés au fourrage à ensiler	39
4.2. Facteurs liés au milieu et à la technique	39
4.2.1. Température.....	39
4.2.2. Conditions de réalisation.....	39
4.2.3. Utilisation de divers adjuvants.....	40
5. Qualité de conservation des ensilages.....	43
5.1. Modifications chimiques	43
5.2. Critères de stabilité et barèmes de notation	43
5.3. Contamination microbiennes et incidences sur l'alimentation	44
6. Pertes à la récolte et durant le stockage.....	44
 1^{ERE} PARTIE : CARACTERISTIQUES ET CONDITIONS DE DESSICCATION DES FOURRAGES DES HAUTS DE LA REUNION	 47
 I.1. INTRODUCTION	 49
I.2. MATERIELS ET METHODES	50
I.2.1. Analyses des fourrages.....	50
I.2.1.1. Composition chimique et pouvoir tampon.....	50
I.2.1.2. Valeurs alimentaires.....	50
I.2.2. Données météorologiques.....	51
I.2.3. Etude de la dessiccation	51
I.2.3.1. Enquêtes sur les chantiers d'ensilage.....	51
PLANCHE DES PHOTOS 3 ET 4	52
I.2.3.2. Cadres pour suivi de dessiccation en andains	53
I.2.4. Traitement des données.....	53
I.3. CARACTERISTIQUES DES FOURRAGES ET APTITUDE A L'ENSILAGE.....	54
I.3.1. Introduction	54
I.3.2. Présentation des principaux fourrages récoltés dans les Hauts de La Réunion ...	54
I.3.2.1. Zones de cultures.....	54
Le dactyle (<i>Dactylis glomerata</i>)	54
Le ray-grass anglais (<i>Lolium perenne</i>)	54
Le ray-grass d'Italie (<i>Lolium multiflorum</i>)	55
Le ray-grass hybride (<i>L. perenne</i> x <i>L. multiflorum</i> ou <i>L. hybridum</i>)	55
La fétuque élevée (<i>Festuca arundinacea</i>).....	55
Le brome cathartique (<i>Bromus catharticus</i>)	55
Le kikuyu (<i>Pennisetum clandestinum</i>)	55
Le chloris (<i>Chloris gayana</i>)	56

I.3.2.2. Composition chimique	56
I.3.2.3. Valeurs alimentaires.....	57
I.3.3. <i>Aptitude à l'ensilage</i>	58
I.3.3.1. Teneur en glucides solubles	58
I.3.3.2. Pouvoir tampon.....	59
I.3.3.3. Commentaires sur l'aptitude à l'ensilage	59
Dactyle	59
Ray-grass anglais.....	60
Ray-grass d'Italie	61
Ray-grass hybride	61
Fétuque élevée	61
Brome	62
Kikuyu	62
Chloris.....	62
I.3.4. <i>Conclusion sur l'aptitude à l'ensilage</i>	63
I.4. CONDITIONS DE DESSICCATION DU FOURRAGE	64
I.4.1. <i>Caractéristiques météorologiques des principales régions d'élevage</i>	64
I.4.1.1. Pluviométrie	64
I.4.1.2. Conditions d'évaporation de l'eau du fourrage	65
Insolation.....	65
Rayonnement global	66
Températures	67
Humidité et déficit de saturation	67
Vents.....	68
I.4.2. <i>Dessiccation du fourrage</i>	68
I.4.2.1. Suivis de dessiccation sur des chantiers en 1990 et 1991	68
I.4.2.2. Etude de quelques facteurs influençant la dessiccation.....	70
Stade du fourrage	70
Rendement fourrager et densité d'andain	71
Hauteur de coupe.....	72
Conditionnement.....	73
Fanage	73
Regroupement d'andains.....	74
I.4.1.3. <i>Conclusion sur la dessiccation des fourrages</i>	74
I.5. CONCLUSION SUR L'APTITUDE DES FOURRAGES POUR L'ENSILAGE EN BALLES ENRUBANNEES	76

2^{EME} PARTIE : ETANCHEITE DE L'ENRUBANNAGE ET RESISTANCE DES FILMS ETIRABLES EN CONDITIONS TROPICALES	77
II.1. INTRODUCTION	79
II.2. MATERIELS ET METHODES	80
II.2.1. Mesures d'étanchéité	80
II.2.1.1. Capteurs utilisés pour la mesure d'étanchéité	80
Débitmètres - régulateurs massiques	80
Capteurs et transmetteurs de pressions	80
Thermocouples et hygromètres	81
II.2.1.2. Centrale d'acquisition, transfert et traitement des données	81
II.2.2. Fût étanche	82
II.2.2.1. Principe et construction	82
II.2.2.2. Méthode expérimentale	82
II.2.3. Balles témoins	83
II.2.3.1. Principe et construction	83
II.2.3.2. Identification des films testés	83
PLANCHE 3 (PHOTOS 5 ET 6)	84
II.2.3.3. Méthodes expérimentales	85
Balles témoins simplifiées	85
Balle d'expérimentation	85
II.2.4. Exposition des films étirables	85
II.2.4.1. Exposition sur balles témoins	85
II.2.4.2. Exposition sur balles d'ensilage	86
II.2.4.3. Exposition sur cadres	86
II.2.5. Traitement des données	86
II.3. INCIDENCES DES PARAMETRES ATMOSPHERIQUES SUR LES MESURES	87
II.3.1. Introduction	87
II.3.2. Modélisation des échanges gazeux	87
II.3.3. Simulations des variations de conditions d'essais	87
II.3.3.1. Influence des principaux paramètres atmosphériques	87
II.3.3.2. Influence de l'humidité et de la température de l'air injecté	89
II.3.4. Conclusion	89
II.4. TESTS D'ETANCHEITE SUR FILMS ETIRABLES	90
II.4.1. Introduction	90
II.4.2. Notion de seuil pour qualifier l'étanchéité	90
II.4.3. Reproductibilité des tests	90
II.4.4. Comparaisons de l'étanchéité de différents films	91
II.4.5. Incidence de différents facteurs sur l'étanchéité	92
II.4.5.1. Etanchéité des faces planes	92
II.4.5.2. Incidence du nombre de couches de film sur l'étanchéité	92
II.4.5.3. Effet collant et étanchéité	93

II.4.6. Conclusion	95
II.5. EXPOSITION DES FILMS ETIRABLES	96
II.5.1. Introduction	96
II.5.2. Durée de vie sur cadres	96
II.5.2.1. Régularité d'étirage des films	96
II.5.2.2. Longévité des films	96
II.5.2.3. Conditions météorologiques.....	98
II.5.3. Observations sur balles témoins.....	98
II.5.4. Observations sur balles d'ensilage.....	99
II.5.5. Conclusion	99
II.6. CONCLUSION SUR L'ETANCHEITE DE L'ENRUBANNAGE.....	100
 3^{EME} PARTIE : PROCESSUS FERMENTAIRES ET QUALITE DE CONSERVATION DES ENSILAGES EN BALLES ENRUBANNEES	 101
III.1. INTRODUCTION	103
PLANCHE DES PHOTOS 7 ET 8	104
III.2. MATERIELS ET METHODES	105
III.2.1. Dispositifs d'essais	105
III.2.1.1. Enquêtes sur la conservation des ensilages réalisés chez les éleveurs des quatre principales régions d'élevage	105
III.2.1.2. Etude de l'influence de différentes teneurs en MS et de différentes additions de sucres solubles.....	106
III.2.1.3. Etude de l'influence de l'addition de conservateurs et de sucres solubles sur deux fourrages récoltés à deux teneurs en MS	106
PLANCHE DES PHOTOS 9 ET 10	108
III.2.1.4. Suivi des fermentations en laboratoire	109
Fourrages étudiés et confection des balles enrubannées	109
Mesures en cours de fermentation	109
Mesures après fermentation	110
Prélèvement d'échantillons.....	111
III.2.2. Prélèvements et analyses	111
III.2.2.1. Echantillonnage	111
III.2.2.2. Analyses.....	111
III.2.3. Barème de notation.....	112
III.2.4. Traitement des données.....	113

III.3. ANALYSES DESCRIPTIVES DE LA CONSERVATION DES ENSILAGES EN BALLES ENRUBANNEES REALISEES CHEZ LES ELEVEURS DE 1990 A 1993	114
III.3.1. Introduction	114
III.3.2. Caractéristiques des ensilages	114
III.3.3. Relations entre les caractéristiques fermentaires et les conditions de récolte	115
III.3.4. Relations entre les notations des ensilages et les conditions de récolte	117
III.3.5. Conditions discriminantes de la qualité des ensilages	118
III.3.6. Différenciations régionales	119
III.3.7. Conclusion	120
III.4. ETUDE DE DIFFERENTS FACTEURS INTERVENANT SUR LES FERMENTATIONS	121
III.4.1. Introduction	121
III.4.2. Teneur en MS	121
III.4.2.1. Analyse des résultats des ensilages en balles enrubannées réalisés de 1990 à 1993	121
Facteurs explicatifs de la teneur en MS	121
Caractéristiques fermentaires et teneur en MS	121
Analyse de la qualité de conservation par classes de MS	124
III.4.2.2. Influence de la teneur en MS sur la conservation d'un dactyle récolté à la Plaine des Palmistes en décembre 1993	125
III.4.3. Espèce fourragère	127
III.4.4. Apport de sucres solubles	128
III.4.4.1. Apport de sucres solubles sur dactyle	128
III.4.4.2. Suivis de fermentations (essai F3 et F4 définis § III.2.1.4.)	128
Dactyle sans préfanage	128
Mélange préfané de dactyle, RGH et kikuyu	130
III.4.4.3. Additions de différentes doses de mélasse sur des dactyles et kikuyus récoltés humides	131
Dactyles sans ressuyage et ressuyé	131
Kikuyus sans ressuyage et faiblement ressuyé	133
III.4.5. Apport de conservateurs	134
III.4.5.1. Sel d'acide formique, inhibiteur de la fermentation	134
Dactyles sans ressuyage et ressuyé	134
Kikuyus sans ressuyage et faiblement ressuyé	135
III.4.5.2. Bactéries lactiques et enzymes, stimulants de la fermentation	136
Dactyle récolté humide (MS = 21%)	136
Dactyle préfané (MS = 30%)	137
Kikuyu avec stolons et humide (MS = 20%)	138
Kikuyu au stade feuillu et humide (MS = 22%)	139
III.4.6. Couleur du film étirable	140
III.4.7. Conclusion	141
III.4.7.1. influence de la teneur en MS	141
III.4.7.2. Influence de l'apport de sucres solubles	141
III.4.7.3. Influence de l'apport de conservateurs	142

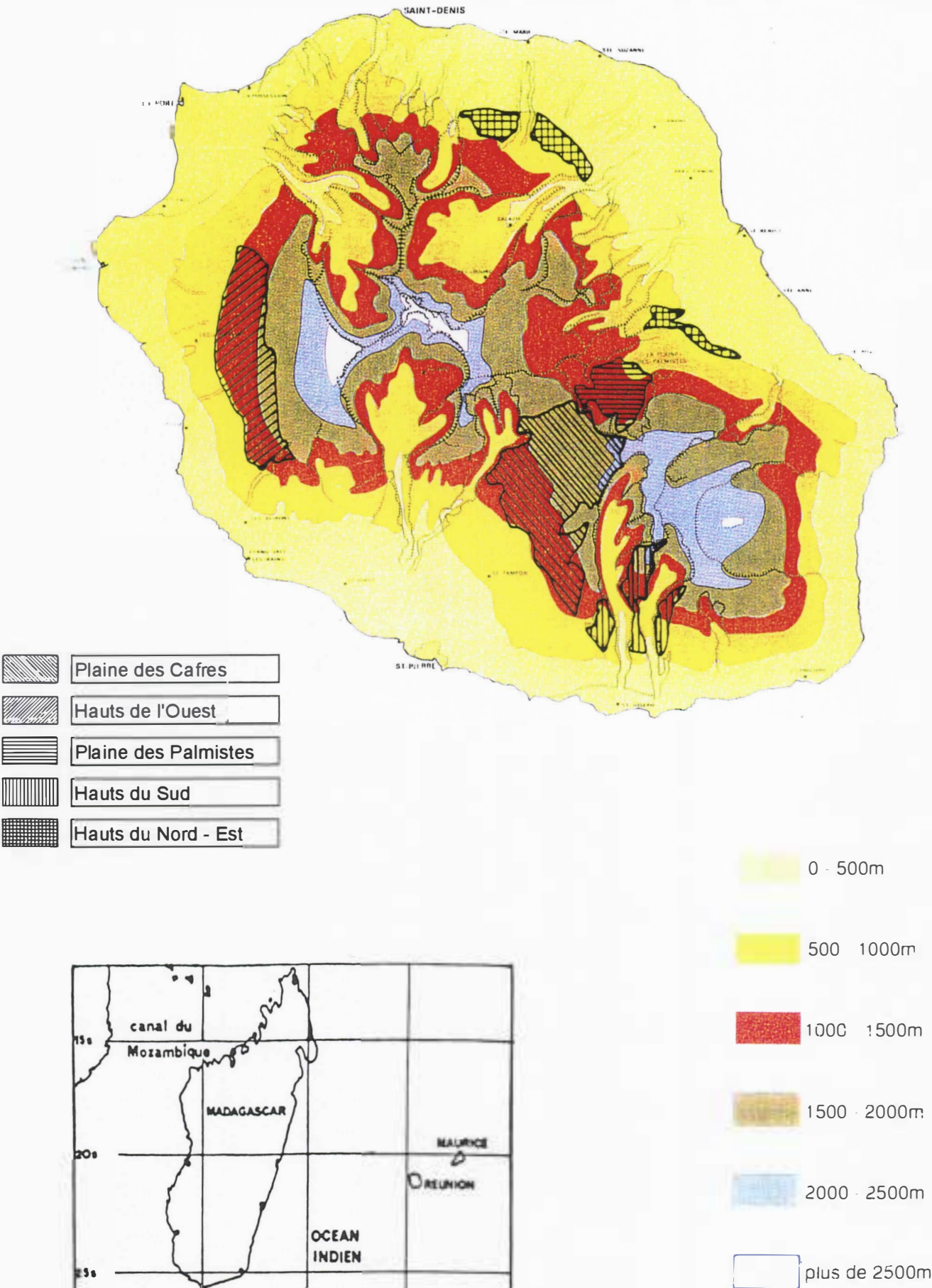
III.5. COMPARAISON AVEC D'AUTRES TECHNIQUES D'ENSILAGE	143
III.6. CONCLUSION SUR LA CONSERVATION DES ENSILAGES	145
4^{EME} PARTIE : APPROCHE DU COÛT DE REVIENT DE L'ENSILAGE EN BALLES ENRUBANNEES	147
IV.1. INTRODUCTION	149
IV.2. MATERIELS ET METHODES	150
IV.2.1. <i>Enquêtes sur les chantiers de récolte</i>	150
IV.2.2. <i>Principe de calcul des coûts des équipements</i>	150
IV.2.2.1. Méthode proposée par l'I.G.E.R. et le B.C.M.E.A.	150
IV.2.2.2. Différenciation des coûts fixes et variables	151
IV.2.3. <i>Traitement des données</i>	152
IV.3. TEMPS DE TRAVAUX.....	153
PLANCHE DES PHOTOS 11, 12, 13 ET 14	154
IV.4. STRUCTURE DES COUTS DU STOCK FOURRAGER	156
IV.4.1. <i>Introduction</i>	156
IV.4.2. <i>Coût de la production fourragère</i>	156
IV.4.3. <i>Consommation d'intrants et coûts</i>	156
IV.4.4. <i>Coût du stock fourrager réalisé en balles enrubannées</i>	157
IV.4.5. <i>Utilisation du matériel en commun</i>	158
IV.4.6. <i>Conclusion</i>	158
IV.5. FACTEURS INFLUENÇANT LE COUT DE L'ENSILAGE EN BALLES ENRUBANNEES (RECOLTE + INTRANTS)	159
IV.5.1. <i>Introduction</i>	159
IV.5.2. <i>Facteurs explicatifs du coût</i>	159
IV.5.3. <i>Caractéristiques et différences régionales</i>	160
IV.5.4. <i>Conclusion</i>	161
IV.6. COMPARAISON AVEC D'AUTRES TECHNIQUES DE CONSTITUTION DE STOCK FOURRAGER ...	162
IV.7. CONCLUSION SUR LE COUT DE REVIENT DES BALLES ENRUBANNEES	163

CONCLUSION GENERALE	165
1. RAPPEL DES OBJECTIFS.....	167
2. CONDITIONS DE REALISATION DES BALLES ENRUBANNEES	167
2.1. <i>Aptitude du fourrage à l'ensilage</i>	<i>167</i>
2.2. <i>Dessiccation du fourrage.....</i>	<i>168</i>
2.3. <i>Etanchéité de l'enrubannage</i>	<i>168</i>
2.4. <i>Résistance des films étirables en conditions tropicales.....</i>	<i>168</i>
3. EVALUATION DE L'ENSILAGE EN BALLES ENRUBANNEES	169
3.1. <i>Conservation des ensilages.....</i>	<i>169</i>
3.2. <i>Coût de revient.....</i>	<i>170</i>
4. CRITIQUES DES METHODES	170
5. PROBLEMES DE RECHERCHE SOULEVES	171
6. DEVELOPPEMENT DE LA TECHNIQUE D'ENSILAGE EN BALLES ENRUBANNEES A LA REUNION....	172
BIBLIOGRAPHIE	173
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	191

PRESENTATION GENERALE

Figure 1

HYPSONOMETRIE



Introduction

1. Développement de l'élevage bovin à partir des systèmes herbagers dans les Hauts de l'île de La Réunion

Depuis une vingtaine d'années, dans le cadre du Plan d'Aménagement des Hauts, l'élevage bovin s'est rapidement développé à partir d'un élevage traditionnel de "boeufs au piquet". Cet essor a été permis grâce à la mise en place d'un programme d'aménagement pastoral des zones d'altitude de l'île : de 600 à 1800 mètres (figure 1) ; les A.F.P.¹ (Dinhut, 1980) ont été les chevilles ouvrières de ce programme financé par les collectivités locales, l'Etat et l'Union Européenne. Les systèmes fourragers sont donc essentiellement basés sur la production d'herbe.

En raison de sa rusticité et de sa productivité, l'espèce la plus répandue est *Pennisetum clandestinum*, ou kikuyu, originaire des hauts plateaux d'Afrique. Cependant, cette graminée tropicale s'avère d'une production limitée à cause du froid et de la sécheresse de l'hiver austral lorsque l'altitude dépasse 1200 mètres. Les espèces d'origine tempérées : *Dactylis Glomerata*, *Lolium sp.*, *Festuca arundinacea*, *Bromus cartharticus*, pour les principales, sont alors préférées. Dans la partie basse de la zone d'élevage, c'est à dire pour une altitude inférieure à 600 mètres, les espèces fourragères sont tropicales avec le *Chloris gayana* ou les cannes fourragères : *Pennisetum purpureum*, *Tripsacum laxum* ...

L'été austral, ou saison cyclonique, est chaud et humide. La production fourragère est donc très abondante durant cette période de l'année. Par contre, elle est nettement ralentie voire arrêtée au delà de 1500 mètres d'altitude durant l'hiver, l'altitude marquant plus fortement les ruptures de saisons (Gilibert, 1981 ; Pichot *et al.*, 1982ab ; Michellon *et al.*, 1984abc, 1985abc).

Les exploitations d'élevage ont des surfaces plutôt faibles : moins de 20 hectares en élevage laitier et de l'ordre de 40 hectares en élevage viande. Pour que ces exploitations soient économiquement viables, une intensification du système fourrager devient nécessaire et le chargement animal sur la surface fourragère s'accroît.

Si durant la période de production abondante d'herbe, les troupeaux ont du fourrage en quantité à défaut de qualité, le déficit fourrager hivernal est le souci majeur des éleveurs contraints de recourir aux têtes et pailles de canne à sucre ramassées en zone littorale ou à la bagasse de canne achetée aux usines sucrières. Cette alimentation est coûteuse en temps et main d'oeuvre, et la collectivité régionale doit chaque année subventionner des stocks de bagasse de médiocre qualité pour aider les éleveurs à faire face au déficit fourrager. Malgré toutes ces mesures, il y a une sous-alimentation des animaux et un recours excessif à l'aliment concentré.

¹ Associations Foncières Pastorales regroupées au sein d'une Union à partir de 1980

Le report de fourrage permet à la fois de combler le déficit fourrager hivernal et d'améliorer la gestion des prairies en période estivale. Diverses expériences de fenaïson ont été tentées dans les années 1980 avec une chaîne complète de matériels acquise à cet effet. La fenaïson dans les Hauts de l'île nécessite au minimum trois à quatre jours sans pluie. Les conditions climatiques de la période cyclonique durant laquelle l'herbe peut-être récoltée autorisent rarement un tel délai. De plus, les brouillards fréquents d'altitude ne permettent pas une dessiccation poussée du fourrage. L'expérience de fenaïson dans les Hauts s'est donc globalement soldée par un échec.

Dans le même temps, à l'initiative de la S.I.C.A.-Lait², quelques agriculteurs des Plaines d'altitude (figure 1 - p. 14) qui avaient un peu pratiqué l'ensilage d'herbe avec des récolteuses à fléaux se sont regroupés pour créer une C.U.M.A.³ autour d'une ensileuse double-coupe plus performante. La technique semblait donner satisfaction mais ne s'est pas développée chez les éleveurs car elle nécessitait la mise en oeuvre d'un matériel important et des surfaces très mécanisables.

A partir de 1987, d'autres éleveurs, notamment dans les Hauts de l'Ouest et du Sud, (figure 1 - p. 14) se sont intéressés à l'ensilage d'herbe. Encadrés par l'Union des A.F.P. à la demande de la Région Réunion, ils ont sollicité le C.I.R.A.D.⁴ au sein duquel une équipe pluridisciplinaire de recherche - développement en élevage venait d'être créée. Un des thèmes abordés fût donc le déficit fourrager hivernal, avec comme première action, l'évaluation de la faisabilité de l'ensilage d'herbe comprenant les aspects de qualité de conservation et de coût du stock fourrager. Les premiers constats n'étaient guère positifs : moins du tiers des ensilages d'herbe bien conservés et des temps de confection des silos très élevés (Paillat, 1987a, 1988a ; Brunschwig, 1988a). Cependant, une marge de progrès importante existait, aussi bien dans le choix des techniques (nécessité de ressuyer ou de préfaner le fourrage), que dans la technicité des éleveurs (assurer une fermeture rapide et parfaite des tas d'ensilage). L'ensilage ressuyé en coupe fine et l'ensilage en balles enrubannées, technique récemment expérimentée en Europe, notamment par le CEMAGREF⁵, ont alors fait l'objet de simulations technico-économiques (Paillat, 1988b) : les deux solutions sont apparues tout à fait envisageables à La Réunion.

2. Recherche en partenariat - expérimentations chez les éleveurs

Le C.I.R.A.D. à La Réunion (environ 180 agents dont 40 chercheurs) est principalement orienté vers la production cannière, enjeu principal du développement agricole de l'île, et les productions fruitières et maraîchères. Pour ces productions, plusieurs stations de recherche sont installées essentiellement en zone littorale.

² Société d'Intérêt Collectif Agricole chargée de la collecte laitière, de l'élevage de génisses laitières et d'approvisionnement

³ Coopérative d'Utilisation du Matériel en Commun

⁴ Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

⁵ Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

Pour ce qui concerne les productions des Hauts⁶, et particulièrement l'élevage, les recherches sont menées chez les agriculteurs en partenariat étroit avec les organismes professionnels. Il en est de même pour les recherches ayant trait à la mécanisation des exploitations. Constituée en 1987, la cellule de recherche - développement en élevage du C.I.R.A.D. (10 agents dont 5 chercheurs) se propose, grâce à des compétences pluridisciplinaires (agronomie, agro-écologie, agro-machinisme, zootechnie, sciences vétérinaires), d'apporter un appui direct aux éleveurs à travers différentes actions sur la production fourragère, l'alimentation des bovins, leur reproduction, la conduite du troupeau et la santé animale. La particularité de cette cellule est également de regrouper différents organismes de recherche, actuellement : C.I.R.A.D. - E.M.V.T.⁷, C.I.R.A.D. - S.A.R.⁸, I.N.R.A.⁹.

Globalement, l'enjeu prioritaire des actions de recherche et de développement conduites est l'augmentation de la productivité des élevages en terme de lait ou viande, avec un souci d'aménagement et de respect de l'environnement, l'objectif étant la viabilité et la pérennité des exploitations d'élevage. Deux raisons principales sous-tendent cet enjeu : ces productions couvrent une part faible des besoins alimentaires de l'île (10 % pour le lait et 25 % pour la viande bovine), l'aménagement pastoral permet d'assurer une vie économique dans les Hauts et une gestion de l'espace valorisable à travers un tourisme de montagne en plein essor.

Dans ce contexte, la Région Réunion soutient les opérations de développement des Hauts et notamment l'aménagement pastoral à travers les A.F.P.. Après 15 années consacrées essentiellement à la création de prairies ou parcours, ces dernières se sont investies dans l'exploitation de la production fourragère grâce à l'équipement de groupements d'éleveurs en matériels. A partir de 1990, deux projets expérimentaux, le premier sur l'ensilage en balles enrubannées et le second sur l'ensilage ressuyé en brins courts, ont été financés par la Région Réunion à travers l'Union des A.F.P. qui a renforcé son dispositif technique. Cette association est donc le partenaire privilégié du C.I.R.A.D. pour les recherches qui ont trait à la mécanisation des exploitations d'élevage et particulièrement des recherches sur les ensilages d'herbe. En plus des nombreux éleveurs qui ont participé à ces projets, au total près d'une soixantaine, d'autres partenaires ont été associés : l'E.D.E.¹⁰ par l'action de quelques techniciens, la S.I.C.A. - Lait avec la ferme produisant des génisses laitières, la C.U.M.A. des Plaines pour la mise en oeuvre de l'ensileuse coupe - fine. Toutes les expérimentations ont été réalisées dans ce cadre de développement. Le principal inconvénient d'une telle imbrication recherche et développement est un contrôle difficile des conditions expérimentales. En contrepartie, des avantages sont à retirer de cette association : transfert de technologie directe auprès des éleveurs, formation des techniciens de développement et des éleveurs, approche des conditions réelles assurant une large gamme de mesures.

⁶ Les Hauts sont définis administrativement par des limites altitudinales : 600 m dans la zone sous le vent, 400 m dans la zone au vent et niveau de la mer pour la zone sud-est du massif de la fournaise (figure 1 - p 14)

⁷ C.I.R.A.D. département d'Elevage et de Médecine Vétérinaire Tropicale

⁸ C.I.R.A.D. département des Systèmes Agro-alimentaires et Ruraux

⁹ Institut National de la Recherche Agronomique

¹⁰ Etablissement Départemental de l'Elevage, service de la Chambre d'Agriculture de La Réunion

Parallèlement à cette implication dans le développement grâce à l'aide de la Région Réunion, la C.O.R.D.E.T.¹¹ a financé plus spécifiquement les recherches sur l'ensilage en balles enrubannées permettant, en complément du financement du C.I.R.A.D. - S.A.R., d'assurer ce travail de thèse. Ce financement a permis l'acquisition de moyens de mesures, la réalisation de dispositifs expérimentaux et les missions d'experts et de suivi de la thèse. Le CEMAGREF (échelon de Montoldre), l'I.N.R.A. (laboratoire des aliments de Theix), l'I.N.A.-P.G.¹² (chaire de machinisme agricole) et le C.I.R.A.D. - S.A.R. (unité de recherche en génie agronomique et mécanisation) ont été largement sollicités pour ces recherches.

3. Hypothèses et objectifs de recherche

Compte tenu des expériences antérieures sur l'ensilage d'herbe à La Réunion, deux hypothèses peuvent être formulées.

- Les contraintes énoncées précédemment inhérentes au milieu physique difficile sont importantes ; néanmoins, il est possible de bien conserver les surplus d'herbe avec la technique d'ensilage en balles enrubannées lorsque les conditions liées au fourrage et à sa récolte sont suffisamment maîtrisées.

- En raison des difficultés d'évolution des machines sur le terrain, le coût de l'ensilage d'herbe est élevé ; cependant, l'ensilage en balles enrubannées peut constituer une solution intéressante pour mieux affourager les animaux tout au long de l'année ; sur la base de la simulation effectuée (Paillat, 1988b), le coût de cette opération doit être comparable à celui des autres techniques d'ensilage dans le contexte des Hauts de La Réunion.

Les objectifs de recherche sont d'analyser les facteurs intervenants dans la conservation des ensilages en balles enrubannées et de cerner la faisabilité de cette technique dans les Hauts de La Réunion avec une approche régionale. Quatre régions d'élevage ont été privilégiées : la Plaine des Cafres, la Plaine des Palmistes, les Hauts de l'Ouest, et de façon plus partielle les Hauts du Sud (figure 1 - p 14).

La démarche de recherche (figure 2) s'intéresse par conséquent à l'ensemble des problèmes qui se posent pour ensiler en balles enrubannées dans un contexte d'élevage de montagne. La figure 2 résume à la fois la démarche et les outils méthodologiques utilisés. On peut distinguer deux étapes : celle (partie supérieure de la figure 2) qui consiste à analyser les conditions de récolte (fourrage, conditions climatiques et technique d'enrubannage) et celle (partie inférieure de la figure 2) qui permet de qualifier l'ensilage en balles enrubannées par rapport aux autres techniques : qualité de conservation, temps de travaux et coûts de revient.

¹¹ Commission d'Orientation des Recherches dans les D.O.M. et T.O.M., Ministère des D.O.M. T.O.M.

¹² Institut National Agronomique Paris - Grignon

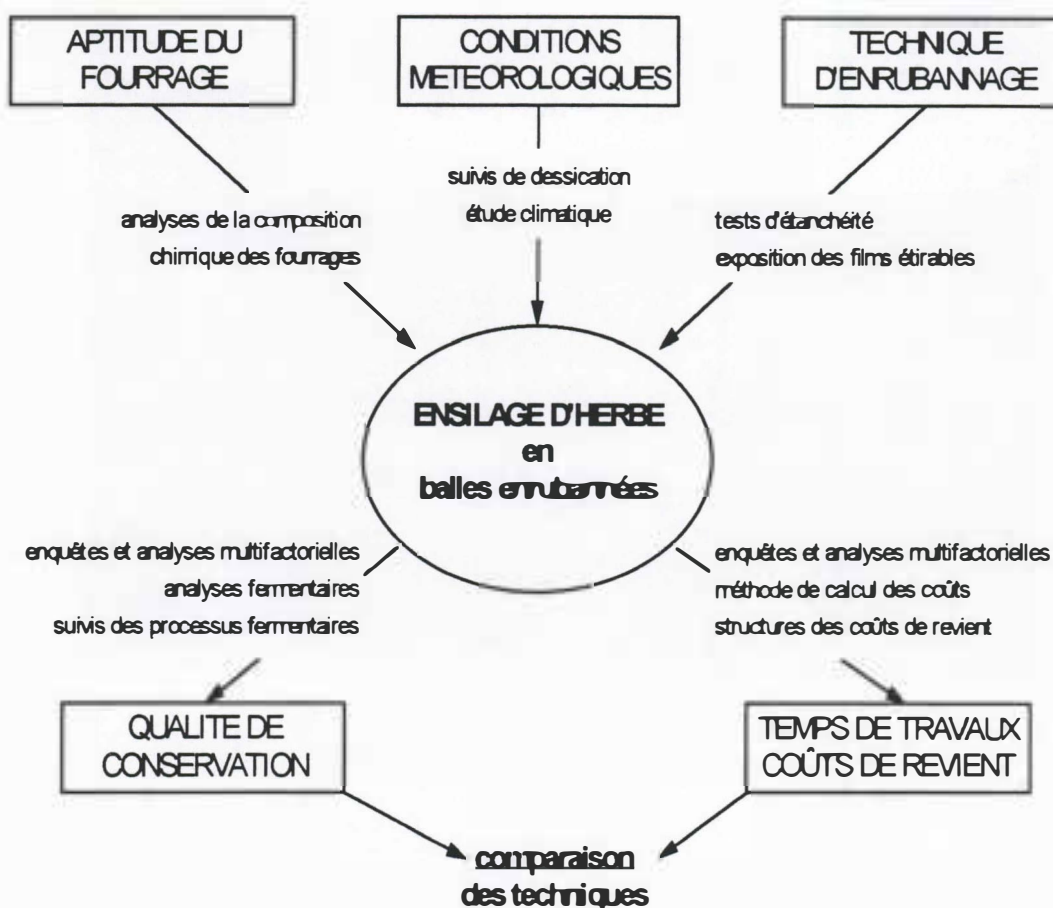


Figure 2 : Présentation de la démarche de recherche, des thèmes de recherche et de la méthodologie mise en oeuvre

Après une présentation du contexte local et une étude bibliographique sur la récolte des fourrages en ensilage incluses dans cette partie de présentation générale, la première partie s'intéressera aux caractéristiques des fourrages récoltés, notamment en ce qui concerne leur aptitude à l'ensilage avec une approche des conditions de dessiccation dans les différentes régions étudiées. La seconde partie traitera de la technique d'enrubannage, avec une étude particulière de la résistance des films en conditions tropicales et d'altitude ; les paramètres de l'étanchéité des emballages seront également abordés. La qualité de conservation des ensilages et l'étude des processus fermentaires, incluant une comparaison entre différentes techniques d'ensilage utilisées à La Réunion, feront l'objet de la troisième partie. Enfin, la quatrième partie sera consacrée à une approche des coûts de confection de l'ensilage en balles enrubannées avec *in fine* une comparaison entre techniques.

Compte tenu de la diversité des thèmes de recherche abordés, chacune des quatre parties comprendra les matériels et méthodes utilisés, les résultats obtenus commentés par une discussion, et les conclusions propres à chaque thème.



Photo 1 : Une île au relief tourmenté



Photo 2 : Les plaines d'altitude

Contexte local de l'étude

1. La Réunion : un milieu physique difficile

Située à l'est de Madagascar (800 km) par 21°07 sud et 55°32 est, La Réunion est une île volcanique de formation récente (figure 1 - p 14). Sa superficie couvre 2512 km² : 70 km dans l'axe NO - SE et 50 km dans l'axe NE - SO. Elle culmine à 3069 mètres avec le Piton des Neiges et constitue la partie émergée d'un volcan établi à partir du fond océanique à -4000 m. Le massif du Piton des Neiges est le plus ancien (2.1 millions d'années) et occupe les 2/3 de l'île au nord-est. Le massif du Piton de la Fournaise, encore actif, s'appuie sur le massif ancien et a été édifié il y a 360000 ans (Chevalier, 1979, Bachelery, 1981, *in* : Perret, 1992). Entre ces deux massifs, une vaste zone constitue les plaines d'altitude s'étageant de 1000 à 1800 mètres. Trois cirques et de nombreuses ravines ou rivières souvent très encaissées, issus des effondrements et de l'action intense de l'érosion pluviale, marquent fortement le paysage.

Cette formation géologique confère à La Réunion, un relief de montagne particulièrement tourmenté (photos 1 et 2) avec des zones appelées plateaux sur la ceinture littorale jusqu'à 500 m d'altitude réservées principalement à la production cannière, des zones de piémont de 500 à 1000 m présentant de très fortes pentes avec des productions très diversifiées : canne à sucre, plantes à parfum, cultures maraîchères et fruitières, petits élevages laitiers ou d'engraissement, des zones de plaines d'altitude¹³ de 1000 à 1500 m, domaine privilégié de l'aménagement pastoral et des grands troupeaux laitiers et allaitants, et enfin des zones de parcours au dessus de 1500 m, avec quelques troupeaux allaitants sur des grandes étendues.

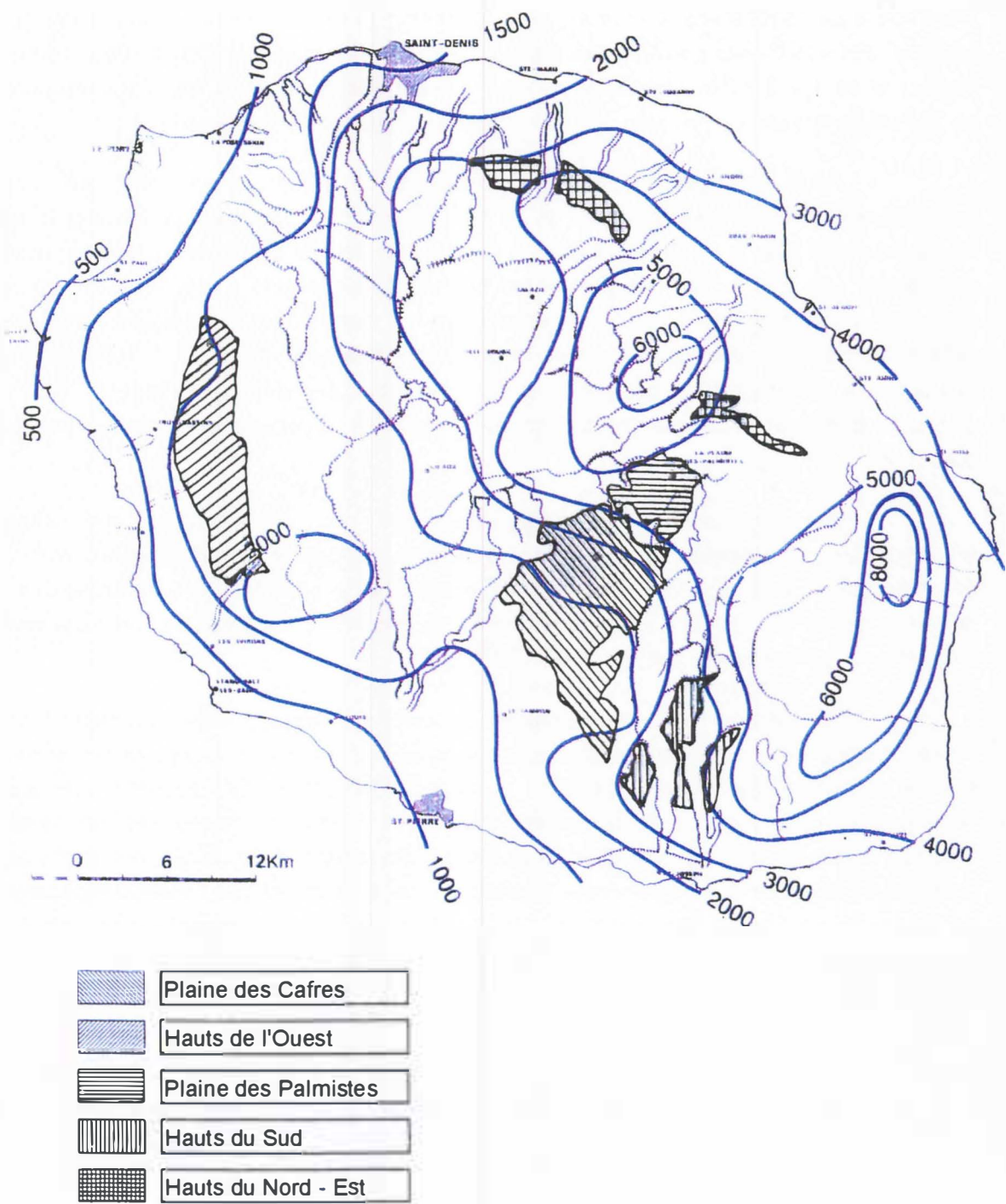
Dans un tel environnement physique, peu de parcelles sont réellement mécanisables. La vocation principale de la surface fourragère demeure par conséquent le pâturage (photo 2). Cependant, dans la zone des Plaines et pour quelques parcelles des Hauts, la mécanisation de la récolte est possible après un aménagement parcellaire et moyennant des coûts d'installation très élevés (Pochier, 1987).

Les prairies sont essentiellement cultivées sur des andosols largement décrits par Perret (1992). Ces sols, issus des cendres volcaniques, sont très légers et renferment une grande quantité d'eau : à partir de 1200 m, ils sont perhydratés. Les andosols sont stables à l'état naturel, par contre, ils se comportent comme des sables et deviennent très sensibles à l'érosion lorsqu'ils ont été travaillés et qu'ils se dessèchent. Les itinéraires techniques de préparation des sols et de semis pour l'installation de prairies ont fait l'objet d'expérimentation en liaison avec l'Union des A.F.P. et les C.U.M.A. ou S.I.C.A. chargées de l'amélioration foncière principalement en zone canne, mais aussi dans les Hauts (Paillat, 1986, 1987b, 1989 ; Paillat *et al.*, 1988).

¹³ Les plaines d'altitude correspondent effectivement à un relief plus "aplani" par rapport à la zone de piémont ; cependant, la topographie des parcelles y reste très accidentée

Figure 3

PLUVIOMETRIE MOYENNE ANNUELLE (en mm)
période 1958 - 1980



On s'oriente actuellement vers le travail minimum du sol, permettant de préserver la fertilité du milieu en réduisant l'érosion. Divers matériels de semis direct, modifiés pour certains au C.I.R.A.D. -S.A.R., ont été testés avec succès durant ces dernières années (Paillat, 1989) ; ces techniques sont actuellement largement vulgarisées par l'Union des A.F.P. dans le cas du renouvellement des prairies. Il reste néanmoins nécessaire lors d'une première implantation de réaliser des travaux du sol, voire d'amélioration foncière : défrichement, épierrage, drainage de surface, réalisation d'exutoires d'eau, afin de rendre les parcelles plus mécanisables, notamment si ces dernières sont destinées à être fauchées.

Les aspects climatiques seront plus largement décrits dans la première partie puisqu'ils conditionnent directement les potentialités de préfanage du fourrage. Cependant, nous pouvons déjà donner les grands traits du climat de la Réunion (Perret, 1992, d'après Cadet, 1980). Deux saisons climatiques peuvent être distinguées : une saison chaude et humide de décembre à avril sous l'influence des courants de mousson du NE et une saison fraîche et sèche de mai à novembre influencée par les alizés du S - SE.

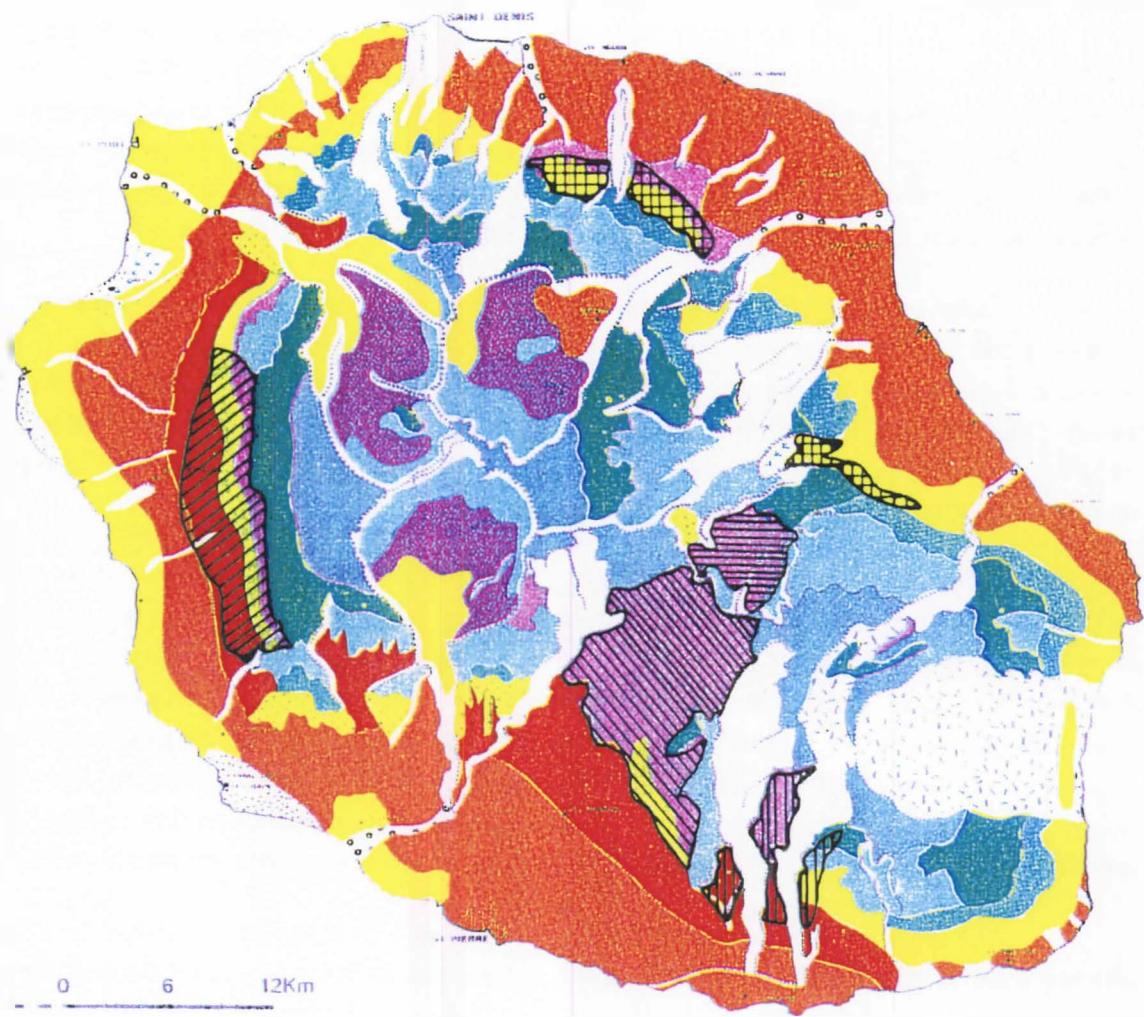
Ces régimes de vents et le relief définissent deux zones distinctes : la zone E - NE "au vent", très humide, avec une pluviométrie annuelle pouvant dépasser 8 m à certains points, et la zone O - SO "sous le vent", très sèche avec une pluviométrie n'atteignant parfois pas 500 mm. L'altitude augmente la variabilité spatiale des conditions climatiques : il pleut davantage sur les reliefs (figure 3). De plus, le passage des dépressions tropicales qui évoluent souvent en cyclones accentue ces différences en raison d'une trajectoire générale NE - SO. Par contre, les pluies de saison sèche, de nature orogénique (condensation des masses d'air en montagne) sont plus constantes. D'autre part, la variabilité interannuelle est très importante.

L'insolation, très importante sur la zone côtière (8 h par jour), devient très faible en altitude à cause des brouillards très fréquents, notamment dans les Hauts de l'Ouest avec moins de 4 h par jour (Génére, 1989). La température varie avec l'altitude selon un gradient de -0.7°C pour 100 m d'élévation en moyenne. Sur la ceinture littorale, les températures sont assez peu variables d'une saison à l'autre. Par contre l'effet de la température et de la saison est plus marqué avec l'altitude. Dans les zones d'élevage, au dessus de 1000 m, quatre saisons pourraient être distinguées : l'été chaud et pluvieux de décembre à mars, période cyclonique, l'automne frais et assez humide en avril et mai, l'hiver froid et sec de juin à septembre et enfin le printemps assez chaud mais plutôt sec en octobre et novembre.

2. L'élevage bovin : rôle dans l'aménagement des Hauts

Les systèmes d'élevage de La Réunion sont assez divers, de l'extensif dans les zones de parcours d'altitude, à l'intensif avec affouragement à l'étable dans la zone de piémont, à la limite de la zone cannière. Ces systèmes à dominante élevage produisent assez souvent d'autres spéculations : pomme de terre, géranium, maraîchage. Cependant, depuis quelques années, on assiste à une spécialisation vers l'élevage exclusif, notamment dans les zones d'altitude. Etudes des fourrages et des systèmes fourragers, typologies d'élevage et études technico-économiques ont été réalisées depuis le début des années 80 pour caractériser les systèmes d'élevage bovin (Mericq, 1980 ; Gilibert, 1981 ; Bridier, 1981 ; Salon, 1992).

VEGETATION NATURELLE PRIMAIRE ET SECONDAIRE (d'après Th CADET)
ET ACTIVITÉS AGRICOLES



VEGETATION NATURELLE

- Absence de végétation (ou lichens, fougères) (volcanisme actuel)
- Végétation endocée d'altitude
- Forêt mesotherme
- Forêt megatherme hygrophile
- Fourrés hygrophiles à Pandanus
- Forêt à Acacia heterophylla (Tamara)
- Forêt secondaire à Goyaviers et Jamroses
- Forêt secondaire à Goyaviers dominants
- Savane semi-aride herbeuse ou arbustive à Leucaena (végétation secondaire)
- Végétation marécageuse
- Végétation indifférenciée des escarpements
- Lits actuels des cônes de déjection

ACTIVITÉS AGRICOLES ET BOISEMENTS

- Canne à sucre
- Geranium et cultures diverses (legumes, maïs, tabac, fruitier, fleurs, riz, etc.)
- Boisement d'Acacia decurrens
- Pâturage d'altitude dominant
- Cultures des "chiques" sur bleds et végétation des zones ravées
- Vanille
- Boisement de Filao sur talles littorales
- Plaine des Cafres
- Hauts de l'Ouest
- Plaine des Palmistes
- Hauts du Sud
- Hauts du Nord - Est

D'après l'annuaire de statistiques agricoles (Agreste, 1993), en 1993, on dénombrait à La Réunion environ 25000 bovins, 35000 caprins et moins de 2000 ovins, pour une surface toujours en herbe de 12400 ha. En fait, les caprins utilisent essentiellement les friches et savanes en partie basse de la zone Ouest. Le cheptel bovin est en augmentation depuis 10 ans (+ 2.7 % par an). On dénombre 4130 vaches laitières et 7120 vaches allaitantes pour une production de lait collecté se situant à 82 500 hl (+ 12 % par an depuis 1984) et une production de viande de 1192 t carcasse (+ 1 % par an depuis 1984). Au contrôle laitier, la production laitière annuelle moyenne était de 3736 kg par vache (E.D.E., 1992, *in* : Agreste 1993) ; pour l'ensemble du troupeau laitier, cette moyenne n'est que de 2200 l par vache. On notera la faible productivité du troupeau laitier réunionnais, alors que le niveau génétique est plutôt élevé grâce à une utilisation importante de l'insémination artificielle depuis une dizaine d'année avec principalement les races F.F.P.N.¹⁴ pour le troupeau laitier : 1416 inséminations premières, Limousin et Charolais pour le troupeau allaitant : 1372 et 941 inséminations premières, respectivement (E.D.E., 1992, *in* : Agreste 1993).

Sur les 252000 ha que compte La Réunion, moins du quart est à vocation agricole (60000 ha). La plus grande partie de l'île, très montagneuse, est couverte de forêts, landes, friches ou affleurements rocheux (170000 ha, soit 70 %). Le reste concerne l'habitat et les infrastructures routières (18000 ha). Malgré les difficultés dues au relief, le réseau routier est très développé et la plupart des exploitations d'élevage sont maintenant désenclavées. Un rapide survol de la surface utilisée par l'agriculture réunionnaise (figure 4) et de son évolution depuis 1985 (tableau 1) montre que l'élevage, grâce aux 400 à 500 ha de prairies créées annuellement par les éleveurs adhérents aux A.F.P., contribue de façon significative à l'aménagement des Hauts : 6200 ha de prairies installées depuis 1975 (Union des A.F.P., 1994). Avec les productions maraîchères, c'est la spéculation agricole qui s'étend le plus en surface.

Tableau 1 : Répartition de la surface agricole utilisée - évolution de 1985 à 1993
(source : Agreste, 1993)

spéculations	1985 (ha)	1993 (ha)	part relative en 1993 (%)	variation 85-93 (% par an)
surface agricole utilisée	65 279	60 219	100	-1.0
canne à sucre	37 500	30 900	51.3	-2.4
surface toujours en herbe	9 580	12 390	20.6	+3.3
productions fruitières	5 102	5 443	9.0	+0.8
productions vivrières	4 380	3 770	6.3	-1.9
productions maraîchères	2 550	3 600	6.0	+4.4
plantes à parfums	2 840	1 135	1.9	-10.8
autres	1 694	1 295	2.1	-3.3
jachères	1 633	1 686	2.8	+0.4

¹⁴ Française Frisonne Pie Noire

Environ 720 exploitations ont des surfaces fourragères et près de 30 % d'entre elles possèdent plus de 10 ha. La surface moyenne par exploitation est de 13 ha alors qu'elle n'est que de 3.5 ha pour l'ensemble des exploitations de l'île et de 2.8 ha pour celles des Hauts (Agreste, 1990). Depuis 1981, on assiste à une augmentation de la taille des troupeaux qui reste cependant très faible, avec 6 bovins seulement par exploitation en 1989. Cette même année, on dénombrait 3069 possesseurs de bovins et 1841 ayant des vaches, mais 1708 et 1252 exploitations, respectivement, ont moins de deux animaux nourris le plus souvent sans surface fourragère, avec les bordures de parcelles et certaines adventices des cultures. Environ 75 % des animaux sont dans des troupeaux dépassant 5 têtes. Si l'on considère que cette limite marque l'élevage comme spéculation dominante, on ne compte alors que 732 éleveurs ayant des bovins ce qui correspond assez bien aux exploitations ayant de la surface toujours en herbe et 366 éleveurs ayant des vaches. Fin 1993, les A.F.P. comptaient 372 adhérents (Union des A.F.P., 1994) dans les Hauts avec des vaches comme cheptel principal. Ces éleveurs sont pour la plupart également adhérents des structures économiques.

La population de La Réunion est en croissance régulière de +1.7 % par an : 597800 habitants (I.N.S.E.E.¹⁵, 1992). Par contre, la population agricole familiale avec 71300 personnes (Agreste, 1990) est en constante diminution, de l'ordre de -5 % par année depuis 1980. Celle concernée par l'élevage de bovins en tant qu'activité principale est faible par rapport aux autres spéculations : moins de 5 % des exploitations agricoles de l'île ; par comparaison 54 % des exploitations cultivent la canne à sucre et 30 % font du maraîchage. La part des productions animales dans la valeur de la production agricole de l'île de La Réunion (tableau 2) s'accroît : 25 % en 1982 et 31 % en 1992, grâce essentiellement à la production avicole. L'élevage bovin ne représente qu'une faible part de cette production. Cependant son impact sur l'aménagement et le développement économique et social des Hauts est très important (ce que nous préciserons au paragraphe 4).

Tableau 2 : Valeur de la production agricole - évolution de 1982 à 1992 (source : Agreste, 1994)

spéculations	1982 (MF)	1992 (MF)	part relative en 1992 (%)	variation 82-92 (% par an)
ensemble	1334	2221	100	+5.2
canne à sucre	562	556	25.0	-0.1
productions maraîchères	185	520	23.4	+10.9
productions fruitières	98	196	8.8	+7.2
productions vivrières	71	142	6.4	+7.2
plantes à parfums	30	23	1.0	-2.6
autres prod. végétales	52	88	4.0	+5.4
aviculture	151	417	18.8	+10.7
porcins	122	177	8.0	+3.8
bovins	52	81	3.6	+4.5
autres prod. animales	11	21	1.0	+6.7

¹⁵ Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

3. Une production fourragère déficitaire en saison sèche

Les conditions pédo-climatiques qui prévalent dans les Hauts de l'île conditionnent la pousse de l'herbe. La production, si elle est rarement complètement stoppée sauf à haute altitude (plus de 1800 m), est fortement ralentie durant l'hiver. Sur les 6200 ha de prairies créées par les A.F.P., une grande majorité est à vocation uniquement pastorale, la fauche n'y est pas possible. Cependant, depuis quelques années, un effort particulier est fait pour améliorer ces prairies et les rendre partiellement mécanisables.

Compte tenu de la charge animale sur la surface fourragère, les quelques parcelles mécanisables de l'exploitation doivent être intensifiées le plus possible afin de permettre un report fourrager utilisable en saison fraîche et sèche. L'apport extérieur est également nécessaire pour certaines exploitations (têtes de canne à sucre, bagasse, foin de *Chloris*). Les surfaces réservées à l'ensilage d'herbe par les éleveurs ont été en croissance permanente depuis 1980 : moins de 100 ha avant 1985 à 150 ha environ en 1990.

Depuis 1990, l'ensilage en balles enrubannées réalisé chez davantage d'éleveurs a permis d'augmenter fortement les quantités d'herbe ensilée : 400, 1600, 2500, 4000 balles en 1990, 1991, 1992 et 1993, respectivement. En 1994, trois chaînes d'ensilage en balles enrubannées fonctionnaient pour près de 5000 balles réalisées, une quatrième chaîne a été acquise par l'A.F.P. de la Plaine des Palmistes fin 1994 ; deux nouvelles chaînes de matériels sont prévues pour 1995¹⁶.

Actuellement, la plupart des troupeaux laitiers et quelques troupeaux allaitants utilisent l'ensilage d'herbe. On peut estimer la surface récoltée pour l'ensilage à plus de 600 ha soit un stock fourrager de près de 2000 t de MS : 250 ha en balles enrubannées, 250 ha d'ensilage ressuyé en brins courts et 100 ha d'ensilage coupe directe en brins moyens à longs. La quantité d'ensilage d'herbe a donc été multipliée par quatre durant les cinq dernières années.

Dans un contexte d'élevage en plein développement, et étant donné l'engouement des éleveurs pour la technique (Lepetit, 1992 ; Lepetit *et al.*, 1992 ; Union des A.F.P., 1994), le nombre de balles enrubannées devrait encore augmenter ces prochaines années, d'où l'utilité des nouveaux équipements prévus. A partir de 1995, chaque région d'élevage disposera d'une chaîne de récolte complète, la Plaine des Cafres nécessitant 2 voire 3 chaînes à terme. Les A.F.P. prévoient également l'équipement de petits groupements d'éleveurs avec faucheuse-conditionneuse, andaineur et cuve à mélasse, afin que les éleveurs participent davantage aux travaux, le pressage et l'enrubannage restant à la charge d'un entrepreneur ou d'une C.U.M.A..

¹⁶ Matériels utilisés pour l'ensilage en balles enrubannées (1994) par l'Union des A.F.P. et la C.U.M.A. des Plaines :
 2 faucheuses-conditionneuses portées Kuhn FC 200 (largeur de travail : 2.10 m), 2 faucheuses-conditionneuses trainées Kuhn FC 250 (largeur de travail : 2.50 m),
 2 faneurs-andaineurs Kuhn GRS25N (largeur de travail : 3.20 m), 2 andaineurs Kuhn GA280 (largeur de travail : 2.80 m),
 4 cuves à mélasse CIRAD-SAR de 700 l,
 2 presses à chambre variable Rivière-Casalis RC115, 1 presse à couteaux et chambre fixe Deutz RB3.20 OC, 1 presse à couteaux et chambre fixe Greenland RF120L,
 3 enrubanneuses trainées Kverneland Silawrap 7510, 7512 et 7517, une enrubanneuse portée Greenland MK1.

4. Environnement socio-économique des éleveurs

L'élevage bovin bénéficie depuis environ une vingtaine d'années d'un encadrement très rapproché. En effet, le Plan d'Aménagement des Hauts mis en route dans les années 75 a permis, grâce à l'effort financier des Collectivités Locales, de l'Etat et de la Communauté Européenne, un développement des zones à vocation élevage.

L'objectif prioritaire est de stabiliser la population des Hauts autour d'une activité agricole viable, pour ralentir la migration vers les zones littorales. De plus, en dehors du domaine forestier, de nombreuses zones agricoles d'altitude (au dessus de 1200 m) retournent à la friche, après avoir connu l'engouement pour la production itinérante de géranium (alternance géranium - friche d'*Acacia mearnsii*). Dans ce contexte, l'élevage bovin, consommateur de surface, permet de limiter l'extension des friches en préservant le milieu naturel. Cet entretien de l'espace favorise l'expansion actuelle du tourisme de montagne, source de développement social et économique des Hauts, notamment au niveau de l'artisanat. Par cet effet de multiplication, l'intérêt de l'élevage bovin à La Réunion dépasse donc largement les simples chiffres énoncés par les comptes de l'agriculture (§ 2).

De nombreux organismes professionnels interviennent, le plus souvent possible en concertation, dans le plan de développement de l'élevage bovin :

- les A.F.P. et l'Union des A.F.P. avec 1 technicien spécialisé en mécanisation,
- l'E.D.E. avec environ 20 techniciens, inséminateurs et contrôleurs de performances,
- la S.I.C.A.-Lait, la S.I.C.A.-RE.VIA.¹⁷, l'A.R.I.B.E.V.¹⁸, l'U.R.COOP.A.¹⁹, la F.R.C.A.²⁰,
- la S.E.D.A.EL²¹, la S.A.F.E.R.²², l'A.P.R.²³, R.G.B.²⁴, le G.D.S.B.R.²⁵, les vétérinaires.

Divers organismes publics et parapublics interviennent en élevage : Région Réunion, Conseil Général, D.A.F.²⁶, C.A.H.²⁷, D.S.V.²⁸, L.V.D.²⁹, C.I.R.A.D., mairies des communes impliquées dans le désenclavement des exploitations d'élevage.

¹⁷ Société d'Intérêt Collectif Agricole Réunion Viande, commercialisation de la production de viande et d'animaux maigres

¹⁸ Association Réunionnaise Interprofessionnelle du Bétail et des Viandes, gérant les fonds FODEBO pour la viande et FODELAIT pour le lait qui garantissent les prix à la production

¹⁹ Union Réunionnaise des Coopératives Agricoles, production et commercialisation d'aliments du bétail

²⁰ Fédération Régionale des Coopératives Agricoles

²¹ Société d'Etudes et de Développement pour l'Amélioration de l'Elevage, amélioration génétique du cheptel viande

²² Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural, installation d'éleveurs sur des lotissements agricoles après reprise des terres en friches ou mal exploitées, notamment

²³ Association pour la Promotion en milieu Rural, animation rurale autour de projets agricoles et/ou artisanaux

²⁴ Réunion Génétique Bovine, groupement d'éleveurs en sélection laitière

²⁵ Groupement de Défense Sanitaire des Bovins de la Réunion

²⁶ Direction de l'Agriculture et de la Forêt

²⁷ Commissariat à l'Aménagement des Hauts, unité D.A.T.A.R. chargée de la politique de développement des Hauts de l'île

²⁸ Direction des Services Vétérinaires

²⁹ Laboratoire Vétérinaire Départemental

La récolte des fourrages en ensilage : étude bibliographique

1. Principe de l'ensilage et techniques de récolte

L'objectif d'une technique de conservation est de préserver le plus possible le potentiel nutritif du fourrage vert, récolté en période excédentaire, pour le restituer à une période de déficit fourrager. Le terme "ensilage" désigne à la fois la technique de réalisation et le produit fini destiné à nourrir des ruminants. L'ensilage est un mode de conservation des fourrages en milieu humide et anaérobie. Son principe est de favoriser un développement des bactéries lactiques, acidifiantes. Si cette acidification, en anaérobiose, est suffisamment rapide et importante, l'action des enzymes du fourrage est stoppée et celle des micro-organismes putréfiants est inhibée (Demarquilly, 1979).

Pour réaliser l'anaérobiose, il convient de contenir le fourrage dans une enceinte hermétique, de manière à interdire toute entrée d'oxygène. Divers conditionnements sont possibles : silos taupinière, couloir, tour ou boudin, balles cylindriques ou parallélépipédiques en meule, en sacs, ou enrubannées (annexe A - pp 9-10).

L'ensilage peut être réalisé soit en coupe directe (annexe A - p 11), soit après un ressuyage ($MS^{30} = 25$ à 30%) ou un préfanage ($MS = 30$ à 40%) ; le mi-fanage se situe entre foin et ensilage avec une teneur en MS comprise entre 40 et 60% (annexe A - pp 12-13). La coupe directe consiste à ensiler le fourrage aussitôt après la fauche. Les chantiers sont alors réalisés rapidement en limitant au maximum les effets du climat. L'inconvénient majeur de la coupe directe vient du fait que l'on récolte un produit parfois très humide dont la conservation est difficile sans apport de conservateurs, et dont la valeur nutritive³¹ est fortement diminuée par les pertes importantes sous forme d'effluents. De plus beaucoup d'eau est transportée au silo, ce qui réduit l'efficacité du chantier.

Le ressuyage ou le préfanage sont des techniques utilisant le séchage naturel plus ou moins prolongé du fourrage au sol. Cette dessiccation préalable à l'ensilage permet d'éliminer une quantité d'eau importante, ce qui, tout en diminuant les temps de chantiers, améliore la qualité de conservation (réduction des risques de fermentations butyriques) et diminue ou annule la production d'effluents. Les pertes au champ sont par contre augmentées. Le mi-fanage est surtout employé pour la récolte des balles rondes, les fermentations y sont très réduites conduisant soit à des ensilages peu acidifiés, soit à des foin humides conservés à l'abri de l'air.

³⁰ teneur en Matière Sèche généralement exprimée en %

³¹ valeur par kg de MS incluant les valeurs énergétique, azotée, minérale, voire vitaminique

Le recours à l'ensilage pour conserver le fourrage présente de nombreux avantages (annexe A - p 13) :

- La récolte peut être réalisée en conditions climatiques difficiles. C'est le cas des récoltes précoces en Europe (avril, mai), alors que le foin n'est réalisable qu'à partir de juin, ce qui permet de récolter des fourrages jeunes et riches n'ayant pas atteint le stade épiaison (graminées). C'est le cas également de la récolte des fourrages en zone tropicale humide, où la saison de pousse de l'herbe est également la saison des pluies.
- Les installations de conservation - silos ou balles enrubannées - sont plus sommaires et moins coûteuses que pour le foin qui nécessite des hangars ou même des granges ventilées lorsque l'air est très humide, cas des Hauts de La Réunion par exemple.
- La qualité du produit ensilé est souvent bonne si le fourrage est apte à l'ensilage et si les conditions de fabrication et de distribution sont respectées, alors que la qualité des foin peut être très aléatoire en fonction des conditions climatiques de réalisation. De plus, le foin perd davantage de valeur nutritive par baisse de la digestibilité.

Néanmoins, la technique d'ensilage présente divers inconvénients qui ont pu limiter son extension, notamment en milieu tropical (annexe A - p. 13) :

- Certaines plantes sont difficiles à ensiler, particulièrement les plantes tropicales qui sont pauvres en glucides solubles. Il est alors nécessaire d'employer des conservateurs qui représentent un coût supplémentaire, ou de préfaner suffisamment, ce qui augmente les risques et tend à diminuer la valeur alimentaire³².
- Les chantiers d'ensilage demandent un équipement en matériel important et, selon la méthode utilisée, requièrent une main d'oeuvre abondante concentrée à un moment donné, ce qui nécessite une bonne organisation. Du fait de la mise en oeuvre de gros matériels, les coûts sont généralement assez élevés. Depuis quelques années, l'ensilage en balles enrubannées permet de garder une certaine souplesse dans l'organisation des chantiers d'ensilage.
- La quantité de fourrage à ensiler doit être suffisante (production de 2 à 3 ha au minimum) pour permettre la réalisation d'un silo correctement dimensionné et réduire ainsi les pertes. Là encore, la technique de l'enrubannage concilie ensilage et gestion individuelle des parcelles, même petites.

2. Aptitude des fourrages à l'ensilage

Différents fourrages ou sous-produits agricoles sont susceptibles d'être ensilés, mais la réussite de leur ensilage dépend essentiellement de trois facteurs : teneur élevée en glucides solubles, substrats de la fermentation lactique, faible résistance à l'acidification mesurée par le pouvoir tampon et teneur en MS suffisante (supérieure à 25 %).

³² valeur incluant la valeur nutritive et l'ingestibilité du fourrage

2.1. Teneur en glucides solubles

Les glucides solubles sont les glucides du cytoplasme solubles dans l'eau et facilement fermentés par la flore de l'ensilage. Ils sont constitués par les sucres (essentiellement glucose, fructose et saccharose) et les fructosanes (chaîne de plusieurs dizaines de fructoses liés à un glucose terminal). L'amidon, non soluble, n'est pas fermenté par les bactéries lactiques (Woolford, 1984, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Plus la teneur en glucides solubles est élevée, plus l'acidification par les bactéries lactiques sera importante. La teneur en glucides solubles nécessaire à l'abaissement suffisant du pH est difficile à connaître car elle dépend du pouvoir tampon et de la teneur en MS du fourrage. Des résultats expérimentaux en laboratoire montrent qu'une teneur en glucides solubles de 90 à 100 g kg⁻¹ MS est nécessaire (Wieringa, 1969, *in* : Demarquilly, 1979) à condition que le pouvoir tampon ne soit pas trop élevé. En pratique, on retiendra une teneur minimale de 100 à 120 g kg⁻¹ MS pour assurer une fermentation correcte (Haigh, 1990 ; Lundén Petterson *et al.*, 1990).

Les graminées d'origine tempérée accumulent les sucres dans les tiges et les feuilles et les fructosanes principalement dans les tiges (Jarrige, 1980). Cette accumulation de glucides solubles les rend aptes à l'ensilage. Par contre, les graminées tropicales accumulent des sucres prioritairement dans les tiges et de l'amidon principalement dans les feuilles. Globalement, la teneur en glucides solubles est beaucoup plus faible que pour les graminées tempérées (Catchpoole, 1971, Smith, 1973, *in* : McDonald *et al.*, 1991 ; Kim *et al.*, 1991). Les différentes espèces et variétés ne présentent pas les mêmes teneurs en glucides solubles : teneur élevée pour le ray-grass d'Italie et faible pour le dactyle avec 180 et 80 g kg⁻¹ MS, respectivement (Henderson, 1973, *in* : McDonald *et al.*, 1991).

Cette teneur augmente avec le stade végétatif au cours du 1^{er} cycle de végétation (cycle reproducteur), en liaison avec une accumulation de fructosanes due à la proportion plus importante de tiges. La concentration est plus élevée en fin de journée après l'action du rayonnement solaire (Waite, 1953, *in* : McDonald *et al.*, 1991). De même, elle est plus importante dans les climats froids avec un fort ensoleillement ; elle diminue avec la chaleur et l'ennuagement (Deinum, 1966 ; *in* : McDonald *et al.*, 1991), phénomène que l'on retrouve à l'île de La Réunion. La fertilisation azotée diminue l'accumulation de fructosanes (Smith, 1973 ; *in* : McDonald *et al.*, 1991). Une forte fertilisation azotée et un ensoleillement réduit diminuent la teneur en glucides solubles (Isselstein, 1993ab).

2.2. Pouvoir tampon

Le pouvoir tampon mesure la capacité du fourrage à résister à l'abaissement du pH. C'est un critère particulièrement important, puisqu'il va conditionner la quantité d'acide lactique nécessaire pour stabiliser l'ensilage, c'est à dire stopper les fermentations indésirables. Plus sa valeur est élevée, plus difficile sera la baisse de pH. Il dépend principalement des anions présents dans la plante sous forme de sels d'acides organiques, de phosphates, sulfates, nitrates ou chlorides, mais également des protéines (Playne *et al.*, 1964, Jones *et al.*, 1967, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Dulphy (résultats non publiés, *in* : Demarquilly, 1979) a montré la liaison entre le pouvoir tampon et les teneurs en matières azotées totales et en cendres du fourrage.

En cours de fermentation, le pouvoir tampon augmente en fonction des quantités d'acides organiques produites (Gouet, 1979a). Il faut donc que la production d'acide lactique soit la plus rapide possible. La hausse du pouvoir tampon peut être importante si la fermeture du silo n'est pas assez rapide (Cabon, 1979), retardant ainsi la fermentation lactique. Plusieurs méthodes permettent de déterminer le pouvoir tampon, dont celle décrite par McDonald (1962) qui exprime sa valeur en quantité d'acide lactique 0.1N (mg) nécessaire pour abaisser à 4 le pH d'un gramme de MS de fourrage.

3.3. Teneur en matière sèche

Plus la teneur en matière sèche du fourrage récolté est faible, plus l'acidification devra être importante : selon Wieringa (1969, *in* : Demarquilly, 1979), à 15 % de MS, le pH de stabilité est de 3.8, alors qu'il est de 5 à 45 % de MS. La teneur en MS du produit ensilé (annexe A - pp 14-16) dépend de la teneur en MS du fourrage à la fauche, mais surtout de la dessiccation au champ (Wilman *et al.*, 1982).

Pour les graminées et légumineuses fourragères classiques récoltées à leur stade optimum de végétation, la teneur en MS sera souvent inférieure à 20 %, d'où la recommandation de l'emploi d'un conservateur pour les ensilages en coupe directe pour être assuré d'une bonne qualité de fermentation et l'intérêt du ressuyage (25 à 30 % MS) ou du préfanage (30 à 40 % MS) quand ils sont possibles.

Dans la dessiccation, les aspects climatiques sont particulièrement importants. Plusieurs auteurs (Parke *et al.*, 1978 ; Thompson, 1981 ; McGechan, 1990ab) proposent d'ailleurs des modèles de dessiccation du fourrage, comprenant de nombreux paramètres climatiques intervenant dans la formule d'ETP³³ selon Penman (Chamayou, 1984). Casagrande (1991) propose, quant à lui, une modélisation basée sur le déficit de saturation de l'air (Luder, 1974, 1982, *in* : Cabon, 1987). Cette dessiccation peut être améliorée grâce à différentes techniques : conditionnement, éparpillage et retournement d'andains (Cornet, 1977 ; Höhn, 1980, 1989 ; Jones *et al.*, 1980 ; Höhn, 1981, *in* : Cabon, 1987 ; Gaillard, 1987 ; Savoie, 1988 ; Pattey *et al.*, 1987).

3. Transformations biochimiques en cours de conservation

3.1. Activité enzymatique

Après la coupe, le métabolisme des plantes continue. Plusieurs activités enzymatiques peuvent être en jeu : la respiration qui consomme les glucides solubles, l'hydrolyse de divers composés carbonés et la protéolyse (métabolisme des composés azotés).

³³ Evapo-Transpiration Potentielle

3.1.1. Respiration

La respiration a besoin d'oxygène, c'est en réalité une combustion des hexoses selon la réaction suivante : $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O + 2870 \text{ kJ}$

Ce phénomène persiste après la fauche tant que la plante est vivante et que la totalité de l'oxygène emprisonné dans le silo n'a pas été consommé. Elle entraîne une perte de MS sous forme de CO_2 et une diminution des glucides solubles, ce qui diminue l'aptitude à la fermentation lactique (Demarquilly, 1979) et la valeur nutritive du fourrage.

Si le silo est fermé rapidement, même sans tassement, la respiration et par conséquent la perte sous forme de sucres demeurent limitées : 2.7 g kg^{-1} MS seulement, pour un fourrage à 20 % de MS peu tassé, selon McDonald (1973, *in* : Demarquilly, 1979). Par contre, si le silo n'est pas étanche, l'air renouvelé alimente constamment la combustion de sucres, les pertes de glucides solubles peuvent alors être très élevées : 50 g kg^{-1} MS selon Demarquilly (1979), et la température de la masse de fourrage s'élève rapidement, ce qui accélère l'activité des protéases (Crawshaw *et al.*, 1979, *in* : McDonald *et al.*, 1991) et la germination des spores butyriques. De même, un délai de fermeture du silo de 48 h après la fin du remplissage allonge considérablement la durée de la respiration : 72 h au lieu de 5 à 6 h lors d'une fermeture immédiate (Langston, 1958, *in* : Demarquilly, 1979).

La respiration dépend beaucoup de la température du fourrage (Dixon, 1979, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Selon Ting (1982, *in* : McDonald *et al.*, 1991), elle est maximale vers 35°C . Elle diminue avec la teneur en MS du fourrage, mais ne cesse réellement que pour des teneurs très élevées (70 % de MS). Elle est également régulée par les concentrations d'oxygène et de CO_2 . Elle diminue rapidement avec le pH (Virtanen, 1953, *in* : McDonald *et al.*, 1991).

3.1.2. Hydrolyse des glucides solubles

Après la fauche, les glucides solubles sont rapidement transformés en glucose et fructose (Demarquilly, 1979). Par des réactions assez complexes, certaines enzymes peuvent également hydrolyser les hemicelluloses et pectines en glucides solubles (Clark, 1974, *in* : McDonald *et al.*, 1991) ; cette activité est cependant réduite, de même que l'hydrolyse de l'amidon en l'absence de malt (Demarquilly, 1979).

3.1.3. Protéolyse

La protéolyse est une hydrolyse des protéines et des peptides en acides aminés. Cette activité enzymatique peut réduire considérablement la proportion des protéines dans le fourrage même pour des ensilages bien conservés (McDonald *et al.*, 1991). L'augmentation de la fraction azotée soluble est importante : de 10 - 25 % dans le fourrage vert à 40 - 60 % dans l'ensilage (Whittenbury *et al.*, 1967, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Cette fraction soluble sera moins bien valorisée par l'animal, d'où une diminution des valeurs azotées du fourrage ensilé par rapport au fourrage vert. Les acides aminés peuvent être également transformés (Heron *et al.*, *in* : McDonald *et al.*, 1991), une faible production d'ammoniac et d'amides pouvant ainsi résulter de l'activité protéolytique des enzymes de la plante (Brady, 1960 ; Gouet *et al.*, 1964, *in* : McDonald *et al.*, 1991).

La protéolyse augmente avec la température et diminue avec la teneur en MS du fourrage et l'abaissement du pH (McDonald *et al.*, 1991), bien que certaines protéases soient encore un peu actives à un pH inférieur à 4 (Tracey, 1948, *in* : McDonald *et al.*, 1991).

3.1.4. Action sur les acides organiques

L'activité enzymatique peut également modifier la composition des acides organiques, bien que ces modifications soient surtout attribuées à l'activité des micro-organismes (Macpherson, 1952 ; Brady, 1960).

3.2. Phase de fermentation

3.2.1. Flore présente sur le fourrage

De nombreuses espèces et souches bactériennes ainsi que des levures et des moisissures sont présentes sur le fourrage vert. Les quantités de ces micro-organismes sont très variables selon la saison, les conditions climatiques, le fourrage, le stade végétatif, le mode d'exploitation et l'apport de matière organique (Gouet, 1979a). Les micro-organismes aérobies, les plus nombreux (10^4 à 10^6 UFC³⁴ g⁻¹ MV³⁵) ont souvent une action putréfiante sur le fourrage et participent peu à la conservation : *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Achromobacter*, coliformes tels que *Escherichia coli*, *Enterobacter* et *Klebsiella*, levures et moisissures (Gouet, 1979a ; McDonald *et al.*, 1991). Des bactéries anaérobies strictes sont également présentes sous forme sporulée : *Clostridium*, *Bacillus*. Les bactéries lactiques, responsables de la bonne conservation des ensilages, sont peu nombreuses (10^2 UFC g⁻¹ MV). Rencontrées principalement sur les tissus végétaux blessés, elles sont en plus grand nombre sur le fourrage apporté au silo car elles commencent à se multiplier si le fourrage est haché.

3.2.2. Bactéries aérobies et coliformes

Le manque d'oxygène provoque très rapidement l'arrêt du développement des bactéries aérobies : *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, si le silo est confectionné en peu de temps et est fermé dès la fin du remplissage (Gouet, 1979a). Cependant, différentes souches parmi les coliformes, bactéries anaérobies facultatives, se développent dans les premiers jours de l'ensilage. Elles transforment les hexoses essentiellement en acide acétique, éthanol, butanediol, CO₂ et H₂, lorsque le pH est inférieur à 6.3 (Wood, 1961, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Leur développement est stoppé par la baisse du pH, liée à l'augmentation de la teneur en acide lactique principalement. Le genre *Enterobacter* est par exemple très sensible aux acides lactique, acétique et formique (Östling *et al.*, 1993). Toutefois, leur consommation de glucides solubles est néfaste au développement de la flore lactique. Ces bactéries, bien que non pathogènes (McDonald *et al.*, 1991), peuvent parfois produire des toxines et une quantité importante d'ammoniac (Henderson, 1984, 1987, *in* : McDonald *et al.*, 1991).

³⁴ Unité Formant Colonie, unité de dénombrement des micro-organismes

³⁵ Matière Verte

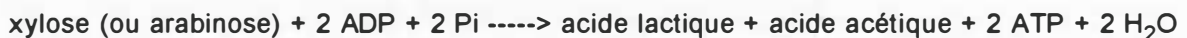
3.2.3. Bactéries lactiques

Micro-aérophyles, non sporulées, elles fermentent les sucres principalement en acide lactique, acidifiant le plus efficace dans l'ensilage et sont divisées en deux groupes selon leur métabolisme (Gouet, 1979a). Dans le groupe des homofermentaires, on rencontre des lactobacilles, principalement *Lactobacillus plantarum* capable de fermenter une large variété de substrats (Dellaglio, 1985, in : McDonald *et al.*, 1991), et des coques : *Pediococcus*, *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Streptococcus*. Le groupe des hétérofermentaires est composé de *Leuconostoc* et de lactobacilles, principalement *L. brevis* et *L. Buchneri*. Les différentes souches de bactéries lactiques présentent divers spectres d'action en fonction du pH et de la température. Leurs développements respectifs suivent les variations des conditions du milieu : la qualité des ensilages d'herbe est dépendante de la flore lactique présente sur le fourrage (Sneath *et al.*, 1986, in : McDonald *et al.*, 1991 ; Müller, 1990, 1994 ; Tjandraatmadja, 1990).

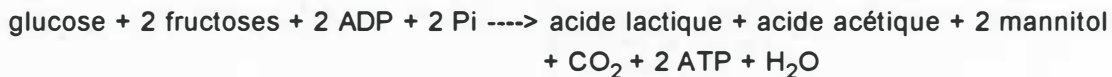
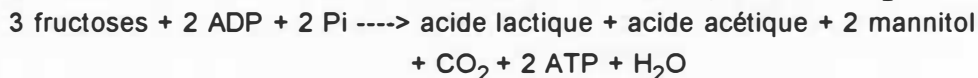
Les bactéries lactiques homofermentaires obligatoires fermentent les hexoses exclusivement en acide lactique (McDonald *et al.*, 1991) ; c'est la réaction la plus acidifiante et par conséquent celle qui est recherchée dans l'ensilage :



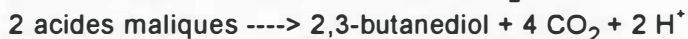
Les bactéries lactiques hétérofermentaires facultatives fermentent les hexoses en acide lactique et les pentoses en acides lactique et acétique (McDonald *et al.*, 1991) :



Les bactéries lactiques hétérofermentaires obligatoires fermentent les hexoses en acide lactique, acétique, éthanol, mannitol et CO₂ (Gouet, 1979 ; McDonald *et al.*, 1991) :



Avec un rendement d'acidification médiocre, les acides organiques peuvent être fermentés par les deux groupes (McDonald *et al.*, 1991) ; c'est le cas pour la luzerne contenant beaucoup d'acides organiques et peu de glucides solubles (Gouet, 1979a) :



³⁶ Adénosine Di-Phosphate

³⁷ Phosphore à l'état ionique

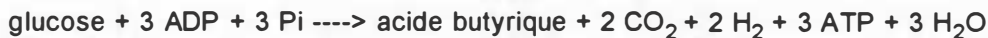
³⁸ Adénosine Tri-Phosphate

Certaines souches de *L. plantarum* sont susceptibles de fermenter l'acide lactique en acide acétique, ce qui peut être préjudiciable à la stabilité de l'ensilage (augmentation du pH car l'acide acétique est plus faible que l'acide lactique). Cette réaction biochimique est cependant peu fréquente (Lindgren *et al.*, 1990, *in* : McDonald *et al.*, 1991).

Les bactéries lactiques ne sont pas protéolytiques, mais elles peuvent parfois désaminer et décarboxyler certains acides aminés (serine et arginine) pour former des amines avec dégagement de NH_3 et CO_2 (Heron *et al.*, 1986, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Elles peuvent également réduire les nitrates en nitrites qui sont ensuite transformés en ammoniac dans les ensilages mal conservés ou en oxyde d'azote dans les ensilages bien conservés (Ohshima *et al.*, 1978).

3.2.4. Bactéries butyriques saccharolytiques

Les bactéries butyriques sont anaérobies strictes, mais elles sont présentes, à l'état de spores, sur le fourrage, dans le sol et les matières fécales. Leur développement n'intervient donc dans les ensilages qu'après une phase de germination. Elles appartiennent au groupe des *Clostridium* et fermentent principalement les sucres et les acides organiques en acide butyrique, d'où leur nom. Leur action sur les protéines et les acides aminés est très faible. Les principales espèces rencontrées sont *C. butyricum*, *C. paraputrificum* et *C. tyrobutyricum* (les plus fréquentes). Elles entrent donc en compétition avec les bactéries lactiques pour les sucres, mais leur germination préalable, qui dépend de la température, les rend peu compétitives par rapport à ce substrat. Par contre, elles dégradent l'acide lactique, ce qui provoque une augmentation du pH et la déstabilisation de l'ensilage (Gouet, 1979a ; McDonald *et al.*, 1991) :



La température favorise la germination et le développement des bactéries butyriques (Leibensperger *et al.*, 1987 ; McDonald *et al.*, 1991). Par contre, une teneur en MS supérieure à 35 % inhibe leur développement, en raison d'une pression osmotique trop élevée (Jonsson *et al.*, 1990). Elles croissent lorsque le pH est supérieur à 4.4 - 4.9, mais leur développement dans des micro-niches de pH plus élevé, favorise leur propagation dans l'ensemble de la masse d'ensilage (McDonald *et al.*, 1991). Wieringa (1969, *in* : Demarquilly, 1979) a déterminé le domaine d'activité des *Clostridium*, avec une relation linéaire liant le pH à la teneur en MS du fourrage : pH = 3.8 pour une teneur de 15 % et pH = 5.0 pour une teneur de 45 %, cette droite caractérise le pH de stabilité de l'ensilage.

Compte tenu de ces caractéristiques, il convient de favoriser les bactéries lactiques de manière à stabiliser l'ensilage à un pH inférieur à 4, ou de préfaner suffisamment le fourrage. Une fermeture de silo peu soignée ou trop tardive, surtout lorsque le fourrage est humide, augmente la respiration, donc la température, diminue la compétitivité des bactéries lactiques et provoque ainsi le développement de la flore butyrique (annexe A - pp 17-18).

3.2.5. Bactéries butyriques protéolytiques

Ce sont également des *Clostridium*, anaérobies strictes, se conservant à l'état de spores et se développant dans l'ensilage après une phase de germination. Les principales espèces de ce groupe sont : *C. sporogènes*, *C. perfringens* et *C. bifermentans*. Sensibles aux pH acides (Gouet, 1979a), elles hydrolysent les protéines et les peptides et conduisent à trois types de réactions à partir des acides aminés et des amides (Ohshima *et al.*, 1978) :

- désamination produisant des acides gras volatils (acétique, propionique, isobutyrique, butyrique, isovalérique), NH_3 et CO_2 ,
- décarboxylation produisant des amines toxiques (histamine, cadavérine, putrécine, tryptamine) et CO_2 ,
- réaction couplée d'oxydoréduction produisant des acides gras volatils (acétique, isobutyrique, isovalérique), NH_3 et CO_2 .

Les *Clostridium* protéolytiques peuvent également dégrader les purines et pyrimidines (Ohshima *et al.*, 1978).

Leur développement est favorisé par la remontée du pH, consécutive à la transformation de l'acide lactique en acide butyrique par *Clostridium tyrobutyricum* notamment. La dégradation de l'ensilage devient alors importante, le rendant parfois impropre à la consommation par les animaux.

3.2.6. Autres micro-organismes

Certaines levures, du genre *Saccharomyces* notamment, peuvent se développer en conditions anaérobies, à condition que l'énergie nécessaire à leur développement ne soit pas limitante. Elles transforment les sucres en alcool et sont de ce fait concurrentes des bactéries lactiques, ce qui est particulièrement le cas dans les ensilages de canne à sucre (Célanie, 1982). Cependant, elles n'utilisent pas l'acide lactique comme substrat. Par contre, si l'anaérobiose n'est pas parfaite, d'autres espèces peuvent se développer et dégrader alors l'acide lactique produit.

3.2.7. Cinétique du développement bactérien dans les ensilages

Toutes les espèces bactériennes, sauf celles qui sont sporulées, se développent dès la mise en silo (Gouet, 1979a). Les bactéries aérobies croissent et s'arrêtent très rapidement à cause de l'épuisement du milieu en oxygène. Elles sont suivies par les coliformes, anaérobies facultatives, produisant essentiellement acide acétique et CO_2 à partir des sucres, et NH_3 et AGV³⁹ à partir des acides aminés.

Les bactéries lactiques se développent également et provoquent une acidification plus ou moins rapide selon les espèces et les conditions de milieu (teneur en MS et en glucides solubles, pouvoir tampon, hachage, qualité et rapidité de fermeture du silo, température).

³⁹ Acides Gras Volatils

Selon Beck (1972, *in* : McDonald *et al.*, 1991), en conditions favorables d'anaérobiose et avec une source de sucres non limitante, l'acidification est initiée par les bactéries lactiques homofermentaires, mais après quelques jours, les hétérofermentaires deviennent souvent dominants et l'acidification est alors plus lente. Si l'acidification est suffisante pour atteindre le pH de stabilité (Wieringa, 1969, *in* : Demarquilly, 1979), les fermentations ralentissent, avec disparition des diverses espèces bactériennes en raison de l'abaissement du pH et de l'appauvrissement du milieu en glucides fermentescibles.

Si le pH de stabilité n'est pas atteint, les spores butyriques germent plus au moins rapidement selon la température et dégradent l'acide lactique, d'où une remontée du pH favorable au développement des bactéries protéolytiques. De même, si l'acidification n'est pas suffisamment rapide, par exemple à cause d'une fermeture différée du silo, l'élévation de température résultant de la phase respiratoire favorise le développement de la flore butyrique.

Les ensilages de fourrages tropicaux semblent présenter des cinétiques de fermentation différentes de celles constatées avec les fourrages tempérés. Leur teneur en glucides solubles est faible. Il apparaît cependant que les hemicelluloses et l'amidon pourraient intervenir comme substrat, mais leur disponibilité pour les bactéries, qu'une laceration énergique du fourrage pourrait améliorer, s'opère lentement (Miller, 1968, *in* : Celanie, 1982 ; Kim *et al.*, 1991). Compte tenu de ces caractéristiques, la flore lactique homofermentaire n'est pas favorisée : peu d'acide lactique est produit (Xandé, 1978), alors que la flore hétérofermentaire serait prépondérante. Ceci conduit à des ensilages avec beaucoup d'acide acétique (Catchpoole, 1965, 1970, 1971, *in* : Celanie, 1982) et des quantités importantes d'ammoniac (Kim *et al.*, 1991). Avec une phase initiale lactique peu marquée et acétique prépondérante, et une seconde phase butyrique après plusieurs jours de conservation, les ensilages de fourrages tropicaux sont difficiles à stabiliser (Aguilera, 1975, *in* : Celanie, 1982).

3.3. Phase post-fermentaire

A l'ouverture du silo, de nombreuses fermentations démarrent, en fonction de l'état de stabilité de l'ensilage, des substrats résiduels, des produits résultants de la fermentation⁴⁰, des conservateurs utilisés, mais surtout de la rapidité de consommation par les animaux. Sous climat tempéré, l'ensilage est souvent distribué en période hivernale et un avancement de 10 cm par jour sur la totalité du front d'ensilage permet de limiter les dégradations (Demarquilly, 1979). Par contre, sous climat chaud et humide (conditions tropicales notamment), il convient d'augmenter la vitesse d'utilisation : de 20 à 30 cm par jour paraissent souhaitables.

Courtin et Spoelstra (1990) ont modélisé les changements intervenant dans l'ensilage lors de la reprise de fermentation aérobie qui résulte dans une élévation de température, une remontée du pH et une perte importante de matière sèche. L'ensilage devient peu appétent et peut entraîner des diarrhées (Demarquilly, 1979). Diverses bactéries, levures et moisissures sont responsables de la dégradation aérobie des ensilages (annexe A - pp 16-17).

⁴⁰ les ensilages mal conservés et contenant des acides propionique et butyrique refermentent beaucoup moins vite que ceux, bien conservés, qui en sont dépourvus (Demarquilly, 1979 ; McDonald *et al.*, 1991)

4. Facteurs influençant les fermentations

4.1. Facteurs liés au fourrage à ensiler

Teneurs en matière sèche, en glucides solubles, en matières azotées, en acides organiques et en cendres conditionnent l'aptitude des fourrages à l'ensilage (§ 2.). Le choix des fourrages destinés à être ensilés se fera donc selon ces critères. Pour les fourrages ayant une mauvaise aptitude à l'ensilage, notamment les fourrages tropicaux, diverses techniques permettent de palier cette difficulté.

Le ressuyage ou le préfanage est la technique la plus directement accessible permettant d'améliorer la conservation (Morgan *et al.*, 1980, *in* : McDonald *et al.*, 1991) : un fourrage humide nécessite une production d'acide lactique très importante pour être stabilisé et cette production nécessaire à la stabilisation diminue au fur et à mesure que la teneur en MS augmente (Wieringa, 1969, *in* : Demarquilly, 1979). Le préfanage permet en outre de réduire ou de supprimer totalement, selon le niveau de séchage, les pertes d'éléments nutritifs, mais polluants, dans les effluents (Bastiman, 1976, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Par ailleurs, l'ingestion d'un fourrage plus sec est très nettement améliorée (Moore, 1960, *in* : McDonald *et al.*, 1991 ; Dulphy *et al.*, 1981b).

4.2. Facteurs liés au milieu et à la technique

4.2.1. Température

La température du fourrage influence les fermentations. Selon Gouet (1979a), l'optimum pour la flore lactique se situe entre 20 et 30 °C. A une température inférieure, la flore bactérienne se développe lentement, l'acidification est retardée. Par contre, une température excessive, résultant en particulier d'une phase respiratoire prolongée, favorise le développement des *Clostridium*. Dans le cas d'ensilages de luzerne bien conservés, Muck *et al.* (1988) montre que la température de stockage augmente la protéolyse et la teneur en ammoniac.

La température joue un rôle important dans l'orientation des fermentations des fourrages tropicaux (Célanie, 1982). Une attention toute particulière doit donc être apportée dans le choix du fourrage, la rapidité de confection et la qualité d'étanchéité du silo.

4.2.2. Conditions de réalisation

La technique de réalisation de l'ensilage influence directement les fermentations et par conséquent la qualité de conservation des ensilages (annexe A - pp 17-18) : hachage ou lacération du fourrage (Gouet, 1979a), tassage, étanchéité du silo ou de l'enrubannage (Cabon, 1979 ; Demarquilly, 1979 ; Lindgren, 1985 ; Gaillard, 1989 ; Lingwall, 1989 ; Woolford, 1990), rapidité du chantier (Demarquilly, 1979), apport de terre (Cabon, 1979).

4.2.3. Utilisation de divers adjuvants

L'incorporation de produits nutritifs (azote non protéique, minéraux) est envisageable, notamment sur maïs, à condition de ne pas trop handicaper la fermentation lactique recherchée (Demarquilly, 1979). De même, des produits absorbants peuvent être employés pour les ensilages très humides, afin d'en réduire les effluents (annexe A - pp 18-19).

Compte tenu de leur utilisation dans ce travail de thèse, nous traiterons ici davantage des stimulants de la fermentation : ferments lactiques, apports de glucides solubles, enzymes, et des inhibiteurs de fermentations : acides, bactériostatiques.

4.2.3.1. Ferments lactiques

Les ferments lactiques, sélectionnés parmi diverses espèces et souches homofermentaires, sont incorporés au fourrage sous forme solide ou liquide selon les spécialités commerciales (Demarquilly, 1979, 1986, 1993 ; Cultivar, 1988). De nombreux essais ont été réalisés durant ces dernières années avec différents produits, en comparaison le plus souvent avec l'ensilage stabilisé avec de l'acide formique, conservateur considéré comme le plus efficace (Pitt *et al.*, 1987 ; Lindgren *et al.*, 1988 ; Andrieu *et al.*, 1990 ; Jonsson *et al.*, 1990 ; Kennedy, 1990b). Les ferments lactiques doivent être incorporés en quantité suffisante (plus de 10^5 et si possible 5×10^5 UFC g^{-1} de fourrage vert) de manière à concurrencer efficacement les autres micro-organismes. *Lactobacillus plantarum* est l'espèce la plus utilisée car elle est particulièrement active même pour des pH inférieurs à 5 ; elle peut être associée à des streptocoques permettant d'acidifier le fourrage dès la mise en silo, lorsque le pH est encore élevé (Lindgren, 1984, *in* : McDonald *et al.*, 1991).

Certaines souches de bactéries lactiques produisent des substances antimicrobiennes et bactéricides (Sneath *et al.*, 1986, *in* : McDonald *et al.*, 1991), leur inoculation dans l'ensilage pourrait également s'avérer intéressante dans l'avenir.

Quelques essais ont également été menés sur fourrages tropicaux (Bates *et al.*, 1989 ; Desvals, 1991) ; l'efficacité des inoculants est peu évidente sur la conservation d'ensilage en coupe directe. Le principal facteur de conservation de ces ensilages est la teneur en MS : elle doit être supérieure à 35 % de manière à inhiber le développement des *Clostridium*. Umana *et al.* (1991) note aussi un effet significatif du préfanage sur la conservation, mais il constate également un effet bénéfique additionnel de l'apport de mélasse et de ferments lactiques à ce fourrage préfané.

En fait, l'incorporation de bactéries lactiques n'est efficace que si la quantité de glucides fermentescibles présente dans le fourrage permet une acidification rapide et suffisante. Les fourrages tropicaux étant très souvent beaucoup trop pauvres, un apport de sucres sous forme de mélasse est nécessaire pour permettre de réaliser des ensilages de qualité. Des enzymes dégradant l'amidon ou les parois végétales pourraient s'avérer également intéressantes pour libérer des sucres, mais leur action doit être très rapide pour être efficace.

4.2.3.2. Apports de glucides solubles

Lorsque la teneur du fourrage en glucides solubles est insuffisante (*i.e.* inférieure à 100 - 120 g kg⁻¹ MS), il convient soit d'apporter les glucides manquants, soit de stabiliser l'ensilage chimiquement avec des acidifiants ou des bactériostatiques.

Les principales sources de glucides sont les mélasses de canne ou de betteraves à sucre, le lactosérum, les farines de céréales, diverses pulpes (betteraves, agrumes, pomme de terre). Les céréales et pulpes devront être accompagnées par des enzymes. L'incorporation de ces divers produits ou sous-produits est très efficace, à condition que les critères de réalisation de l'ensilage soient respectés (rapidité, étanchéité ...) et que les quantités ajoutées soient suffisantes, sinon les glucides ajoutés profiteront aux micro-organismes aérobies et aux *Clostridium*.

Il est inutile d'incorporer des glucides solubles à des fourrages suffisamment riches, l'excès se traduira par des teneurs plus élevées en acide acétique, facteur d'inappétence, et en alcool (Demarquilly, 1979).

Dans le cas d'ensilages de fourrages tropicaux, Xandé (1978), Célanie (1982), Umana *et al.* (1991) notent un effet améliorateur de l'adjonction de mélasse sur la qualité de conservation.

4.2.3.3. Enzymes

L'incorporation d'enzymes : amylases, hemicellulases, cellulases, permet d'augmenter la disponibilité en glucides fermentescibles provenant de l'amidon ou des parois. L'augmentation de digestibilité qu'elles entraîneraient, souvent affirmée par les fabricants, reste à démontrer.

Généralement, l'action enzymatique est complémentaire de l'action des inoculants bactériens : les inoculants agissent au début de la fermentation en intensifiant l'acidification, les amylases permettent de compléter la fermentation en libérant des sucres, tandis que les cellulases agissent sur les fibres à plus long terme car elles sont actives à des pH relativement bas (Pitt, 1990).

4.2.3.4. Acides

Les acides minéraux sont employés depuis longtemps pour stabiliser les ensilages. Le mélange A.I.V. (*i.e.* Arturo I. Virtanen, nom de l'inventeur) était composé d'acides sulfurique et chlorhydrique. Ce produit permettait d'obtenir des ensilages très stables avec un pH inférieur à 3.8. Suite aux difficultés de manipulation (produit dangereux) et aux problèmes d'acidité et de déséquilibre minéral rencontrés chez les animaux consommant en grande quantité ces ensilages A.I.V., les acides organiques, notamment l'acide formique, ont rapidement remplacé les acides minéraux (Demarquilly, 1979, 1986 ; Wilson *et al.*, 1979, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Kennedy (1990a) a montré l'efficacité supérieure sur l'ingestion de l'acide formique par rapport à l'acide sulfurique.

Les acides organiques étant beaucoup plus coûteux que les acides minéraux, les doses préconisées sont plus faibles : à la dose de 3.5 litres d'acide formique à 85 % par tonne de fourrage vert (5 l t^{-1} MV pour la luzerne), le pH est abaissé instantanément à 4.3 - 4.6, la fermentation lactique doit prendre ensuite le relais pour stabiliser l'ensilage. De nombreux essais ont été effectués avec des ensilages additionnés d'acide formique (Henderson *et al.*, 1976, 1979, *in* : McDonald *et al.*, 1991 ; Dulphy *et al.*, 1981a ; Haigh, 1990 ; Kennedy, 1990a). C'est actuellement un des conservateurs les plus efficaces. Il ne règle cependant pas les pertes par jus des ensilages très humides ; au contraire, il tend à accroître ces pertes par effet de plasmolyse sur les cellules (Demarquilly, 1986). Relativement peu d'essais ont été effectués sur des fourrages tropicaux : l'efficacité est moins nette que sur fourrages tempérés (Célanie, 1982 ; Lavezzo *et al.*, 1989 ; Desvals, 1991).

Des mélanges d'acides organiques peuvent également être employés (O'Kiely, 1993). Les acides organiques à plus longue chaîne ont une action anti-bactérienne plus marquée, mais ils sont plus délicats à l'emploi (odeurs) et plus coûteux (Woolford, 1975, *in* : Demarquilly, 1979).

Certains sels d'acide formique : formiate de calcium, de sodium, tetraformiate d'ammonium, sont également employés. Ils ont l'avantage d'être plus faciles à utiliser, car peu dangereux, et d'être non corrosifs pour les machines. Ces produits se décomposent en acide formique lorsqu'ils sont en contact avec le fourrage. Cependant, leur efficacité est moindre que celle de l'acide ; la dose d'application doit donc être augmentée (McDonald *et al.*, 1991). Le tetraformiate d'ammonium libère de l'ammoniac, ce qui peut être un inconvénient dans le cas d'ensilages d'herbe ou de légumineuses déjà trop riches en ammoniac.

4.2.3.5. Bactériostatiques

Le formol est le principal bactériostatique employé en association le plus souvent avec un acide (sulfurique ou formique) selon les produits commerciaux. En effet, utilisé seul à forte dose, il permet d'obtenir une bonne conservation de l'ensilage, avec peu d'ammoniac et beaucoup de sucres résiduels. Mais de ce fait, ces ensilages sont très instables à l'ouverture du silo. De plus, l'addition de formol aux doses nécessaires à la conservation tanner⁴¹ trop les protéines, diminue l'ingestion et la digestibilité. En association en faible quantité (1 à 1.5 l t^{-1} MV) avec l'acide formique, il permet de diminuer la dose d'acide et de tanner suffisamment, mais pas trop, les protéines (Demarquilly, 1979).

D'autres agents anti-microbiens peuvent être utilisés (McDonald *et al.*, 1991) : le métabisulfite de sodium, le dioxyde de soufre, le bisulfate de sodium ou d'ammonium, la soude. Leur action est nulle ou insuffisante pour une conservation parfaite de l'ensilage (Demarquilly, 1979). Le sel, chlorure de sodium, a également été utilisé, mais s'est avéré un très mauvais conservateur d'ensilage (Gouet *et al.*, 1970, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Les antibiotiques se sont avérés peu efficace également.

⁴¹ limitation de la dégradabilité enzymatique des protéines dans le rumen

5. Qualité de conservation des ensilages

5.1. Modifications chimiques

Les variations de la composition chimique classique (matières minérales et azotées, cellulose brute) sont peu importantes si l'ensilage n'a pas produit d'effluents et s'il est bien conservé. Au cours du processus de fermentation, les glucides solubles et les acides organiques disparaissent pratiquement pour former de l'acide lactique, des acides gras volatils et des alcools. Une partie des protéines, des amides et des peptides sont dégradées en acides aminés, eux mêmes plus ou moins dégradés en ammoniac, AGV ou amines (Demarquilly, 1979).

Ces produits issus des dégradations vont servir de critères pour qualifier les ensilages (annexe A - p 19). La composition en acides aminés peut être totalement modifiée (Brady, 1960 ; Fujita, 1976 ; Ohshima *et al.*, 1978).

Les modifications chimiques affectent, par ailleurs, la couleur. Une couleur brun clair apparaît suite à l'altération de la chlorophylle par les acides organiques (Watson *et al.*, 1960, *in* : McDonald *et al.*, 1991 ; Makoni *et al.*, 1993). Une couleur brune très prononcée est signe d'un échauffement anormal ; dans ce cas presque la totalité du carotène est détruite (Demarquilly, 1979).

5.2. Critères de stabilité et barèmes de notation

Les critères retenus pour déterminer la qualité et la stabilité des ensilages sont les suivants : pH, teneurs en MS, acide lactique, AGV et alcools, proportions d'azote soluble et d'ammoniac par rapport à l'azote total. Différents barèmes ont été établis à partir de ces caractéristiques fermentaires. Sauvart *et al.* (1979) propose une comparaison des différents barèmes de notation : Zelter, I.N.R.A. Theix, Wieringa, Flieg, pH corrigé. Ces différents systèmes sont très corrélés entre eux. Certains barèmes (Flieg, Wieringa, pH corrigé) sont indépendants de la teneur en MS et tiennent peu compte de l'ingestibilité ; par contre ils prennent en compte le pH et l'acide lactique. Le barème de l'I.N.R.A. Theix, quant à lui, s'intéresse peu à l'acide lactique et au pH, par contre, il permet d'apprécier la qualité de conservation, l'ingestibilité et la qualité de l'azote.

Demarquilly (1979), Dulphy *et al.* (1981a) proposent de qualifier les ensilages en 5 classes à partir des produits issus de la fermentation : barème I.N.R.A. Theix (tableau 3). Pour apprécier la qualité de l'azote, les proportions d'ammoniac et d'azote soluble sont retenues. Pour apprécier la qualité de conservation, les critères proportion d'ammoniac, acide butyrique et pH en fonction de MS sont utilisés, le critère acide acétique peut également compléter la notation. L'ingestibilité de l'ensilage dépend de la proportion d'ammoniac, des quantités d'acides gras volatils et particulièrement de la quantité d'acide acétique.

Tableau 3 : Qualité de conservation des ensilages selon le barème de Dulphy et Demarquilly (1981a)

classe	AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	C ₂ ⁴²	C ₄ ⁴³	N-NH ₃ ⁴⁴ (% N total ⁴⁵)			N sol ⁴⁶
		g/kg MS		maïs	luzerne	autres	(% N total)
excellent	< 330	< 20	0	< 5	< 8	< 7	< 50
bon	330 - 660	20 - 40	< 5	5 - 10	8 - 12	7 - 10	50 - 60
médiocre	660 - 1000	40 - 55	> 5	10 - 15	12 - 15	10 - 15	60 - 70
mauvais	1000 - 1330	55 - 75	> 5	15 - 20	15 - 20	15 - 20	> 65
très mauvais	> 1330	> 75	> 5	> 20	> 20	> 20	> 75

5.3. Contamination microbiennes et incidences sur l'alimentation

En plus des critères de conservation, d'ingestibilité et de qualité de l'azote, le dénombrement microbien peut s'avérer utile pour des ensilages médiocres dans certaines situations (annexe A - p 20) : fabrication fromagère (*Clostridium tyrobutyricum*), risques d'intoxication alimentaire (*C. botulinum*), pathologies (*Listeria*, mycoses, mycotoxicooses). Les modifications chimiques intervenant dans les ensilages ont une influence sur l'alimentation des ruminants (annexe A - pp 20-21). Ce sont principalement les matières azotées qui sont affectées, d'autant plus que l'ensilage est mal conservé (Fujita, 1976 ; Ohshima *et al.*, 1978 ; Dulphy, 1979 ; Andrieu *et al.*, 1992). La teneur en énergie brute et la digestibilité sont peu modifiées (Andrieu *et al.*, 1987 ; McDonald *et al.*, 1991). L'état de conservation influence directement l'ingestibilité (Dulphy *et al.*, 1981b ; Thomas *et al.*, 1985).

6. Pertes à la récolte et durant le stockage

Des pertes de différentes natures (figure 5) interviennent dans le processus d'ensilage (annexe A - pp 22-23) (McGechan, 1989, 1990c) :

- pertes en cours de dessiccation dans le cas des fourrages ressuyés, préfanés ou mi-fanés, qui sont dépendantes des conditions climatiques et de la durée du séchage ; pertes par respiration, par protéolyse enzymatique, pertes mécaniques et liées à la pluie,
- pertes en gaz et par les jus intervenant en cours de fermentation,
- pertes de distribution liées à l'ensilage inconsommable.

⁴² Acide acétique
⁴³ Acide butyrique
⁴⁴ Azote sous forme ammoniacale exprimé en % de l'azote total
⁴⁵ Azote total (méthode Kjeldhal sur fourrage frais)
⁴⁶ Azote sous forme soluble exprimé en % de l'azote total (méthode Kjeldhal sur jus d'ensilage)

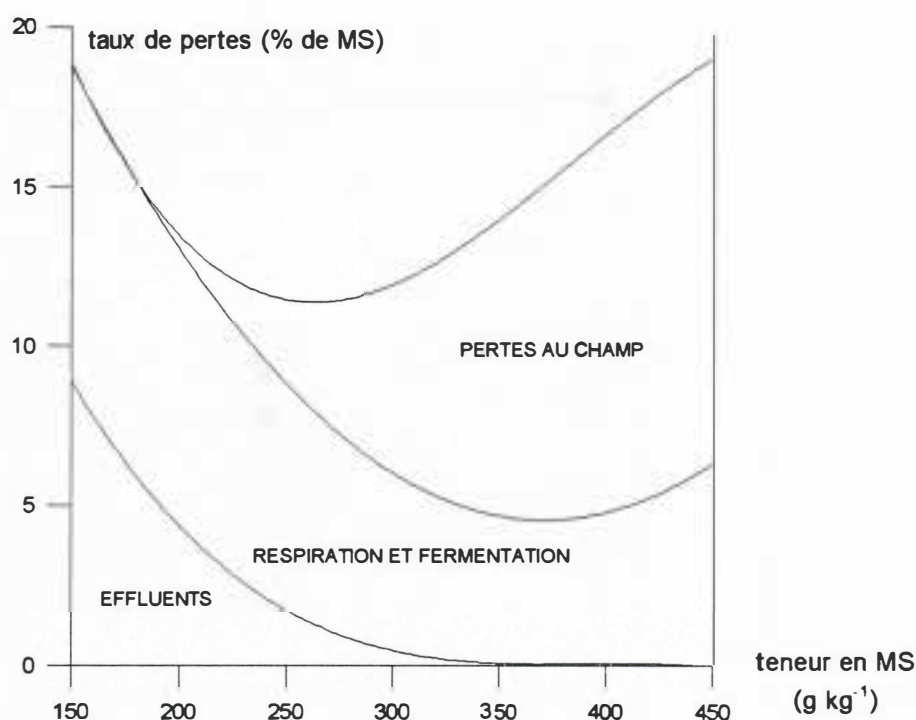


Figure 5 : Modélisation des pertes de matière sèche dans les ensilages bien confectionnés (Zimmer et al., 1984, Wilkinson et al., 1988, in : McDonald et al., 1991)

Les pertes en cours du processus d'ensilage existent systématiquement, sous forme de valeur nutritive (cas des matières azotées principalement) mais également sous forme de matière sèche non distribuée aux animaux. Ces pertes peuvent être très réduites avec des ensilages confectionnés rapidement, bien fermentés et distribués de façon adéquate. Par contre, elles peuvent être très importantes, voire quelquefois totales, si les critères de réalisation de l'ensilage n'ont pas été respectés. Les différentes techniques d'ensilage ont donc un impact sur le niveau des pertes (tableau 4).

Tableau 4 : Estimation des pertes de matière sèche selon la technique d'ensilage (Corrot, 1993)

bilan des pertes (% du poids sec)	foin récolté par beau temps	balles enrubannées à 50% de MS	ensilage en coupe fine à 25% de MS
au champ	12 - 18	4 - 7	2 - 3
à la conservation	1 - 2	4 - 7	10 - 15
à la reprise	# 0	0 - 3	3 - 7
à l'utilisation	2 - 4	1 - 2	0 - 2
pertes totales	15 - 24	9 - 19	15 - 27

Les pertes n'ont pas été mesurées dans les conditions réunionnaises. Cependant, on peut penser que les pertes les plus importantes sont liées à la conservation, car les ensilages en balles enrubannées sont en moyenne assez humide (30 % de MS). Par ailleurs, les pertes au champ doivent être supérieures à celles enregistrées en métropole du fait du fourrage récolté (kikuyu) et des difficultés de récolte (parcelles exigües et de forme tourmentée, topographie ...).

1^{ère} Partie :

CARACTERISTIQUES ET CONDITIONS DE DESSICCATION DES FOURRAGES DES HAUTS DE LA REUNION

I.1. Introduction

La conservation des fourrages par voie humide est fortement dépendante de la nature des fourrages (Demarquilly, 1979 ; McDonald *et al.*, 1991). La composition chimique, notamment par les teneurs en glucides solubles, en matières azotées et en cendres, est déterminante de la bonne fermentation du fourrage. De même, la teneur en eau conditionne fortement la réussite de l'ensilage. De plus, ce critère est essentiel dans le cas de l'ensilage en balles enrubannées (Gaillard, 1989 ; Andrieu *et al.*, 1992 ; Corrot, 1993).

Cette première partie présente donc les fourrages cultivés dans les Hauts de La Réunion et leurs conditions de récolte. Cela nous permettra de mieux analyser la qualité de conservation des ensilages obtenus, objet de la troisième partie.

Le premier chapitre présente les matériels et méthodes utilisées.

Le second chapitre est consacré à la caractérisation des fourrages produits dans les Hauts de La Réunion, *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne*, *Lolium multiflorum*, *Lolium hybridum*, *Festuca arundinacea* et *Bromus catharticus* pour les espèces tempérées, *Pennisetum clandestinum* et *Chloris gayana* pour les espèces tropicales. Nous nous attarderons plus spécialement dans ce chapitre sur l'aptitude de ces différents fourrages à l'ensilage. Des précisions sont développées en annexe B : caractéristiques générales avec notamment le rendement fourrager, évolution de la composition chimique en fonction de la localisation, des saisons et du stade de récolte, valeurs alimentaires.

Le troisième chapitre traite des conditions de dessiccation dans les différentes régions d'élevage de l'île, principalement la Plaine des Cafres, la Plaine des Palmistes et les Hauts de l'Ouest. Ce chapitre comprend les résultats d'une étude des caractéristiques météorologiques régionales et les résultats de suivis de dessiccation permettant de cerner les paramètres importants et propres aux conditions des Hauts de l'île. Certains compléments sont apportés dans l'annexe B.

I.2. Matériels et méthodes

I.2.1. Analyses des fourrages

I.2.1.1. Composition chimique et pouvoir tampon

Les données, reprises dans la présentation des fourrages, proviennent des analyses chimiques réalisées dans les laboratoires du C.I.R.A.D. - E.M.V.T. (données collectées par Bigot, 1991), de l'U.C.A.A.B.⁴⁸ (données collectées par Brunschwig, 1988, 1989). Le laboratoire C.I.R.A.D. à La Réunion (données collectées par Paillat, 1992, 1993, et Mandret, 1993) utilise les méthodes d'analyses du C.I.R.A.D. - E.M.V.T. (Duche *et al.*, 1989) :

- détermination de la teneur en MS par séchage à l'étuve pendant 48 h à 75°C,
- détermination de la teneur en MAT⁴⁹ par dosage de l'azote total (méthode Kjeldhal),
- détermination de la teneur en MM⁵⁰ par dosage des cendres (méthode C.E.E.),
- dosage de la cellulose brute CB⁵¹ (méthode de Weende),
- détermination des constituants pariétaux à partir des techniques proposées par Van Soest (NDF⁵², ADF⁵³, lignine),
- dosage des glucides solubles (méthode de Somogyi),

Le pouvoir tampon (PT), est la quantité en mg d'acide lactique 0.1N nécessaire pour abaisser à 4 le pH de 1 g de fourrage séché et broyé (McDonald *et al.*, 1962).

I.2.1.2. Valeurs alimentaires

Les données exprimées par Gilibert (1981, 1983) ont été calculées à partir des équations "I.N.R.A. 1978" ou à partir de la dMO⁵⁴ estimée par la pepsine-cellulase. La méthode U.C.A.A.B. pour déterminer UFL⁵⁵, UFV⁵⁶, PDIN⁵⁷, PDIE⁵⁸ utilise les équations "I.N.R.A. 1988", suivant le choix ci-après établi par Brunschwig (1989) pour le dactyle et les ray-grass : équation du 1^{er} cycle pour toutes les repousses sauf celles de juin à septembre pour lesquelles ont été retenues les équations des 2^{ème} et 3^{ème} cycles.

⁴⁸ Union des Coopératives Agricoles d'Aliments du Bétail

⁴⁹ Matières Azotées Totales (N total x 6.25)

⁵⁰ Matières Minérales

⁵¹ Cellulose Brute

⁵² Neutral Detergent Fiber

⁵³ Acid Detergent Fiber

⁵⁴ digestibilité de la Matière Organique

⁵⁵ Unité Fourragère pour la production Laitière

⁵⁶ Unité Fourragère pour la production de Viande

⁵⁷ Protéines Digestibles au niveau de l'Intestin, permises par l'azote (N)

⁵⁸ Protéines Digestibles au niveau de l'Intestin, permises par l'Energie

Pour le kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) (Bigot, 1991), la dMO retenue est la moyenne des 8 équations suivantes, utilisées habituellement sur fourrages tropicaux (C.I.R.A.D. - E.M.V.T., 1992) :

- dMO ₁ = 1.1947 MAT + 47.7	(n = 73, r = 0.71),
- dMO ₂ = -0.7514 CB + 87.3	(n = 73, r = 0.49),
- dMO ₃ = -0.5781 ADF + 83.6	(n = 73, r = 0.46),
- dMO ₄ = -2.1248 ADL ⁵⁹ + 71	(n = 73, r = 0.40),
- dMO ₅ = 0.4488 dégMS ⁶⁰ + 34.1	(n = 69, r = 0.42),
- dMO ₆ = 0.4763 dégMO ⁶⁰ + 33.9	(n = 69, r = 0.47),
- dMO ₇ = 1.2 MAT - 0.8 ADL + 52	(n = 59, r = 0.73),
- dMO ₈ = 0.842 dégMO + 5.522 MAT - 0.0744 dégMO x MAT	(n = 57, r = 0.997),

(n = nombre d'échantillons ; r = coefficient de régression)

dMO, dégMS et dégMO sont exprimées en %, et MAT, CB, ADF, ADL (composition chimique du fourrage) exprimés en % de MS. Les valeurs obtenues sur le kikuyu présentent une grande variabilité ; le choix, bien qu'arbitraire, de cette dMO moyenne, a cependant été retenu. Pour cette espèce, lors d'un essai conduit en Afrique du Sud, Dugmore (1988) ne trouve, quant à lui, aucune relation significative entre dMO et MAT, CB, N soluble.

I.2.2. Données météorologiques

Les données météorologiques ont été acquises auprès de Météo-France. Les stations retenues pour chacune des régions (figure 3 - p 22), ne représentent que grossièrement les conditions climatiques des zones d'élevages. Pour les Hauts de l'Ouest, la pluviométrie peut être appréhendée par 8 postes s'échelonnant de 725 à 1530 m d'altitude. Les températures et la durée d'insolation sont suivies sur 3 postes (780, 1105 et 1380 m), le vent n'est mesuré qu'à Petite France (1105 m). Pour la Plaine des Cafres, seule une station (1550 m) est utilisable pour les données de pluies, températures, insolation et vent. Une seule station (1025 m), donnant ces mêmes paramètres, est utilisable pour la Plaine des Palmistes. Les données climatiques des Hauts du Sud n'ont pas pu être obtenues car la station n'est en place que depuis 1990.

I.2.3. Etude de la dessiccation

I.2.3.1. Enquêtes sur les chantiers d'ensilage

Afin de caractériser la technique, 15 chantiers d'ensilage en balles enrubannées en 1990 et 24 en 1991 ont été suivis.

⁵⁹ Acid Detergent Lignin

⁶⁰ dégradabilité enzymatique de la Matière Sèche ou de la Matière Organique par la pepsine cellulase Hcl 0.1 N (Aufrère *et al.*, 1988)

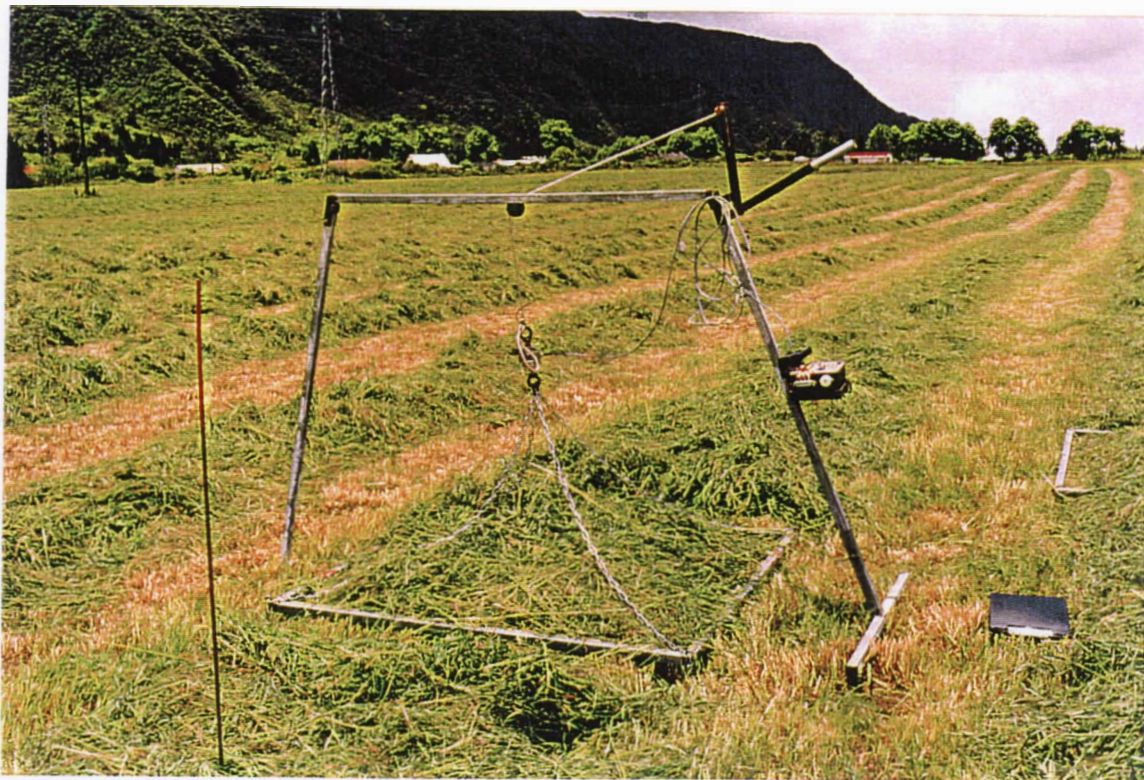


Photo 3 : pesée du fourrage sur les cadres, en cours de dessiccation, en respectant la structure de l'andain

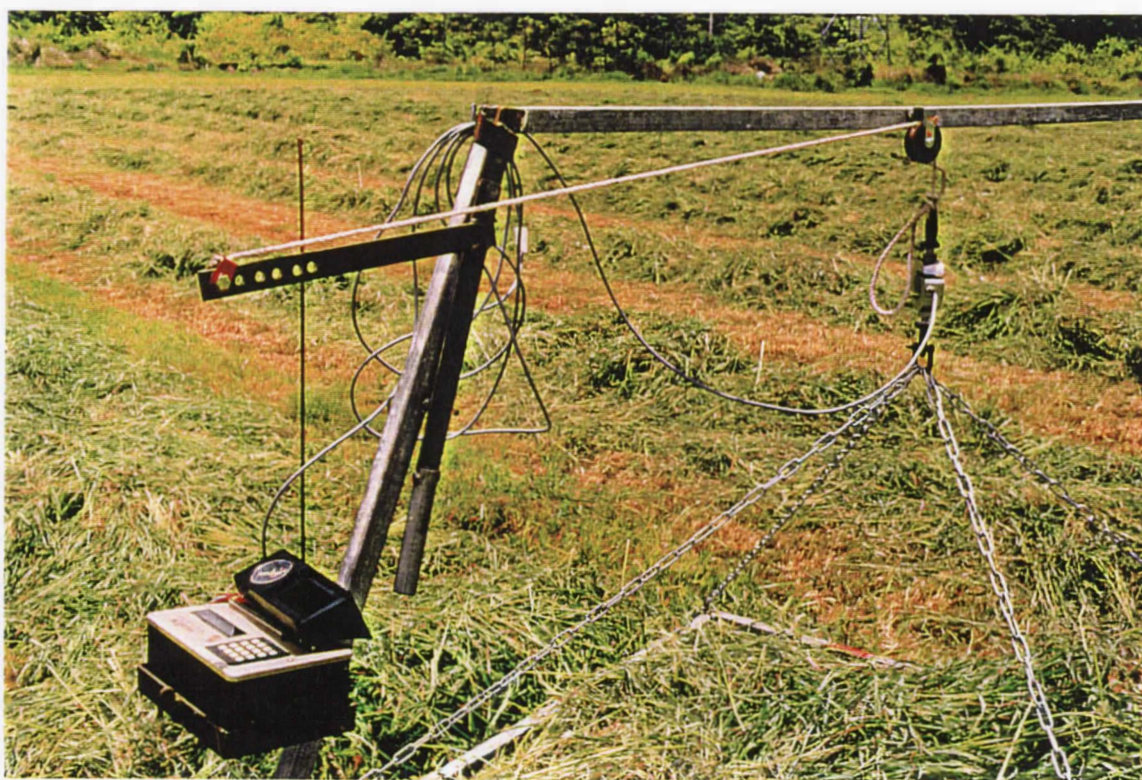


Photo 4 : capteur de pesée 0 - 50 kg et centrale d'acquisition de données

Les données enregistrées, mesurées ou calculées dans cette enquête sont les suivantes :

- région (1 = Hauts de l'Ouest, 2 = Plaine des Cafres, 3 = Plaine des Palmistes, 4 = Hauts du Sud),
- saison de récolte (codifiée par le mois),
- surface (ha) mesurée avec un topofil (distance parcourue par le déroulement d'un fil),
- conditions de mécanisation regroupant l'aptitude de la parcelle à la mécanisation et du fourrage à la récolte (1 = facile, 2 = assez facile, 3 = assez difficile, 4 = difficile),
- proportion d'espèces tempérées (%) calculée à partir d'un rapide relevé botanique,
- stade végétatif de récolte (1 = feuillu, 2 = montaison, 3 = début d'épiaison, 4 = épiaison, 5 = floraison ou beaucoup de stolons pour le kikuyu),
- conditions météorologiques (1 = beau temps, 2 = peu de nuages, 3 = couvert, 4 = pluie),
- teneur en MS mesurée sur un prélèvement, effectué avec une carotteuse cylindrique à moteur, par balle d'ensilage et pour 3 à 5 balles par chantier, à l'étuve (80°C, 24 heures) en 1990 et au four à micro-ondes en 1991 (Corrot, 1991) (annexe E - p 85),
- rendement en MS ($t\ ha^{-1}$) calculé avec la surface, la teneur en MS, le poids des balles (annexe E - p 84) et le nombre de balles par hectare.

L'apport de MS par la mélasse a été retranché pour obtenir la teneur en MS du fourrage au pressage, en prenant comme hypothèse que la teneur en MS a peu varié pendant le processus de conservation. De même, le rendement fourrager, a été diminué du poids de MS apporté par la mélasse. Les notations des conditions météorologiques ont été vérifiées par les données de la station Météo-France la plus proche. En 1990, un suivi de dessiccation a été réalisé avec 3 prélèvements par parcelle, 3 fois par jour aux mêmes endroits (Brunschwig, 1990). En 1991, la teneur en MS à la fauche a été estimée par extrapolation des données connues sur les fourrages, selon l'espèce, le stade végétatif et les conditions météorologiques.

I.2.3.2. Cadres pour suivi de dessiccation en andains

Aussitôt après la fauche, des cadres métalliques de 1.40 m x 1.40 m, remplis d'un tressage de fil nylon formant des mailles de 5 cm x 5 cm, sont disposés sous l'andain sans le perturber, (photos 3 et 4). Un capteur électronique (Captels) relié à une centrale d'acquisition de données (annexe D - p 67) a mesuré le poids du fourrage sur les cadres toutes les deux heures environ. Dans chaque essai, plusieurs cadres ont été mis en comparaison avec caractérisation des conditions de fauche et de la structure de l'andain et recueil des données météorologiques fournies par la station la plus proche.

I.2.4. Traitement des données

Les fichiers sont traités avec le tableur Excel - Microsoft Inc. (Frater *et al.*, 1992), les analyses de variances (Gouet *et al.*, 1989) avec le logiciel SPSS Inc. (M.J. Norusis, 1990), les analyses multidimensionnelles avec le logiciel Stat - I.T.C.F. (Philippeau, 1986 ; Tomassone, 1988 ; Dervin, 1988 ; Tranchefort *et al.*, 1991) et les régressions (Tomassone *et al.*, 1989, 1993) et graphiques avec le logiciel Grapher - Golden Software Inc. (Kecler *et al.*, 1993).

I.3. Caractéristiques des fourrages et aptitude à l'ensilage

I.3.1. Introduction

Les résultats analysés dans cette partie sont issus de différents essais conduits par le C.I.R.A.D., publiés sous forme de documents de travail (Bigot, 1991) et pour certains non publiés (Brunschwig 1988, 1989 ; Mandret, 1993). Ils font appel également à quelques références bibliographiques locales (Gilibert, 1981 ; Michellon *et al.*, 1984abc, 1985abc ; Pichot, 1982ab). Certaines données, notamment sur les glucides solubles et le pouvoir tampon, ont été acquises en cours de thèse, grâce au Laboratoire d'Analyses du C.I.R.A.D. à La Réunion.

I.3.2. Présentation des principaux fourrages récoltés dans les Hauts de La Réunion

Une étude plus complète de chacun des fourrages est présentée en annexe B. Nous nous attacherons seulement à décrire ici, les zones de culture, ainsi que les compositions chimiques et valeurs alimentaires moyennes, avec les valeurs extrêmes observées.

I.3.2.1. Zones de cultures

*Le dactyle (*Dactylis glomerata*)*

Depuis 1976, la culture de cette graminée (annexe B - pp 27-29) s'étend dans les Hauts de La Réunion (Gilibert, 1981) - dans les pâturages des Hauts de l'Ouest où elle tend à remplacer le kikuyu lorsqu'une exploitation en ensilage est prévue - à la Plaine des Cafres, notamment en altitude, où le kikuyu voit sa production chuter de façon importante en hiver - mais également dans les prairies de fauche de la Plaine des Palmistes, à cause de sa bonne longévité. Elle est aussi exploitée dans les Hauts du Sud. Elle résiste très bien au pâturage et est bien appréciée par les animaux (Bigot, 1991). Son exploitation par la fauche est très aisée (Lepetit *et al.*, 1992). De ce fait la récolte sous forme d'ensilage est possible.

*Le ray-grass anglais (*Lolium perenne*)*

Cette graminée (annexe B - pp 30-32) est parfois cultivée dans certaines zones de la Plaine des Cafres, d'altitude suffisamment élevée, et dans les Hauts du Sud : plateau de Grand-Coude à 1200 m d'altitude, région humide et assez fraîche. Les essais dans les Hauts de l'Ouest ont montré ses limites en saison sèche : sa pérennité peut être fortement diminuée lorsque survient une sécheresse marquée (Bigot, 1991). La Plaine des Palmistes (1000 à 1200 m), très arrosée, présente des conditions de température trop élevée.

Son chevelu racinaire dense et sa bonne couverture du sol lui permettent de bien résister au piétinement ; elle est donc très adaptée au pâturage (G.N.I.S., 1983). Sa structure, avec des nombreuses talles petites et des feuilles étroites, convient mal à la fauche : elle a tendance à se coucher (A.C.T.A., 1987) et le ramassage par le pick-up n'est pas très aisé.

Le ray-grass d'Italie (Lolium multiflorum)

Cette graminée (annexe B - pp 33-35) est cultivée à la Plaine des Cafres. A La Plaine des Palmistes, sa sensibilité à la rouille et son chevelu racinaire peu portant l'ont exclue.

Le ray-grass hybride (L. perenne x L. multiflorum ou L. hybridum)

Cette espèce (annexe B - p 36) est le résultat du croisement du ray-grass anglais avec le ray-grass d'Italie, qu'elle a pratiquement remplacés, à l'initiative de la S.I.C.A. - Lait. Sa vocation est souvent l'ensilage. On la rencontre dans toutes les régions d'élevage des Hauts de l'île, surtout à la Plaine des Cafres (au dessus 1200 m) et dans les Hauts du Sud. Elle convient moins à la Plaine des Palmistes où chaleur et humidité provoquent des rouilles importantes. Elle est utilisée dans les Hauts de l'Ouest, mais résiste mal en cas de sécheresse sévère. Actuellement, les éleveurs préfèrent le ray-grass hybride au ray-grass anglais, car il est un peu moins sensible à la sécheresse et plus facile à récolter, et au ray-grass d'Italie, car il est plus pérenne et présente les mêmes caractéristiques de productivité et de rapidité d'installation

La fétuque élevée (Festuca arundinacea)

Sa principale zone de culture est la Plaine des Palmistes, en raison de sa résistance aux conditions difficiles (inondation, températures, piétinement). Cette plante (annexe B - p 37) est également appréciée dans certaines zones humides de la Plaine des Cafres. Elle a aussi été testée avec succès par l'I.R.A.T.⁶¹ en conditions sèches des Hauts de l'Ouest. Le principal frein à son développement est la difficulté à l'installer et à l'exploiter au bon stade.

Le brome cathartique (Bromus catharticus)

Le brome (annexe B - p 38) est actuellement peu cultivé à La Réunion : quelques parcelles à la Plaine des Palmistes et à la Plaine des Cafres semblent donner de bons résultats. La S.I.C.A. - Lait essaie donc, depuis peu, de le promouvoir, notamment pour produire des réserves fouragères sous forme d'ensilage. Des essais à diverses altitudes sont en cours.

Le kikuyu (Pennisetum clandestinum)

Cette graminée pérenne (annexe B - pp 39-41), originaire des hauts plateaux du Kenya, a un port rampant avec des stolons présentant de nombreux noeuds pouvant s'enraciner (Gilibert, 1981), ce qui rend la fauche et la récolte en ensilage difficiles (Lepetit *et al.*, 1992). Le mode d'exploitation le plus adapté est le pâturage car sa résistance au piétinement est élevée.

⁶¹ Institut de Recherche en Agronomie Tropicale (actuellement C.I.R.A.D. département des cultures annuelles)

L'extension des surfaces en kikuyu à La Réunion a été très importante à partir de 1975, avec le développement de l'élevage bovin. Actuellement, le kikuyu est présent dans toutes les régions hautes de l'île (à partir de 600 m). Les zones principales d'exploitation du kikuyu sont la Plaine des Cafres et les Hauts de l'Ouest. Au-dessus de 1500 m, il est sensible aux gelées et peut alors accuser un arrêt végétatif pendant une partie de l'hiver austral.

Le chloris (Chloris gayana)

Cette graminée pérenne originaire du sud de l'Afrique (annexe B - p 42) pousse en climats tropicaux ou tempérés chauds. Elle est bien connue à La Réunion où l'I.R.A.T. a réalisé de nombreux essais. Le chloris donne d'excellents résultats de productivité jusqu'à 800 m d'altitude (Gilibert, 1981). Depuis quelques années, il est la source de production de foin. Produit en zone littorale irriguée, celui-ci est destiné à l'alimentation des bovins des Hauts en période de déficit fourrager ou en complément des rations estivales riches en eau (Brunschwig, 1991). Certains éleveurs des zones de piémont (400 à 800 m) l'utilisent en pâturage ou récolté en vert. Dans ces zones, la récolte en balles enrubannées pourrait être envisagée.

1.3.2.2. Composition chimique

La composition chimique des fourrages varie de façon importante selon le stade de récolte mais aussi la saison (annexe B - pp 27-42). Le tableau 5 présente des données pour un stade précoce sans tenir compte des variations saisonnières. Les valeurs extrêmes, à stade végétatif comparable, donnent une idée de la variabilité. La teneur en glucides solubles, critère important pour la réalisation de l'ensilage, sera traitée spécifiquement (§ 1.3.3.).

Tableau 5 : Teneurs moyennes et extrêmes en matière sèche (MS), en matières azotées totales (MAT), en cellulose brute (CB) et en matières minérales (MM), pour les principaux fourrages récoltés à un stade jeune entre 21 et 42 jours de repousse

espèce	nb	MS (%)	MAT (g kg ⁻¹ MS)	CB (g kg ⁻¹ MS)	MM (g kg ⁻¹ MS)
dactyle ⁽¹⁾	25	17 (14-21)	216 (135-290)	266 (195-330)	102 (94-109)
ray-grass anglais ⁽¹⁾	26	17 (13-22)	174 (118-205)	260 (195-305)	96 (90-102)
ray grass d'Italie ⁽¹⁾	26	13 (11-15)	187 (95-290)	241 (185-305)	105 (79-125)
ray-grass hybride ⁽²⁾	21	15	130 (105-185)	250	100
fétuque élevée ⁽³⁾	2	15 (13-17)	200 (198-215)	300	90
brome cathartique	1	nd	200	nd	nd
kikuyu ⁽⁴⁾	8	17 (12-20)	190 (135-233)	240 (230-295)	95 (83-109)
chloris ⁽⁵⁾	3	19 (18-21)	92 (64-147)	330 (310-350)	90 (86-105)

(1) données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989 à la Plaine des Cafres (1600 m)

(2) données de février à avril recueillies par Mandret en 1993 à la Petite France (1300 m)

(3) différentes références d'auteurs : Gilibert (1983), Bigot (1991)

(4) données recueillies par Bigot en 1989 à la ferme S.E.D.A.E.L. (1000 m)

(5) différentes références d'auteurs : Gilibert (1983), Brunschwig (1991), Mandret (1993)

Pour la plupart des fourrages, les teneurs présentées (tableau 5) sont assez proches des données métropolitaines (Demarquilly *et al.*, 1980) ou d'Afrique du Sud pour le kikuyu (Dugmore, 1988). On constate cependant des teneurs en MAT et CB souvent plus élevées, et des teneurs en MS et MM plus faibles. Les aspects climatiques, températures et pluviométrie importantes, faibles insolation dans les Hauts liées aux brouillards orogéniques, pourraient expliquer ces différences et les variations saisonnières constatées (Isselstein, 1993ab).

En outre, chez les éleveurs, l'exploitation de l'herbe est rarement faite à un stade précoce. La teneur en MAT est alors diminuée et celle en CB augmentée (annexe B - pp 27-42).

Par ailleurs, pour certains fourrages, peu de données sur la composition chimique sont disponibles. De plus, les données plus nombreuses, notamment pour le dactyle, les ray-grass et le kikuyu, ont été recueillies dans des lieux et temps précis et parfois même à une saison particulière. Il est donc difficile d'appréhender complètement la composition chimique des espèces fourragères de La Réunion. Des recherches plus précises devront être conduites afin de mieux cerner les variations liées à l'âge de la repousse, à la saison, à l'altitude et à la région.

I.3.2.3. Valeurs alimentaires

Les remarques précédentes valent pour les valeurs alimentaires (tableau 6). A un même stade végétatif précoce, les variations saisonnières (annexe B - pp 27-42) peuvent être importantes. L'effet du stade est également important, notamment sur les valeurs azotées, mais seulement à partir de 7 semaines de repousse. L'épiaison, qui n'est intervenue qu'au printemps dans l'essai conduit par Brunschwig (Plaine des Cafres, 1600 m, en 1988 et 1989), entraîne une forte diminution de la digestibilité ; les valeurs énergétiques sont alors diminuées.

Tableau 6 : Valeurs alimentaires moyennes et extrêmes, unité fourragère pour le lait (UFL) et la viande (UFV) et protéines digestibles intestinales (PDIN et PDIE), pour les principaux fourrages récoltés à un stade jeune entre 21 et 42 jours de repousse

espèce	nb	UFL (kg ⁻¹ MS)	UFV (kg ⁻¹ MS)	PDIN (g kg ⁻¹ MS)	PDIE (g kg ⁻¹ MS)
dactyle ⁽¹⁾	25	0.89 (0.81-1.00)	0.83 (0.73-0.92)	132 (80-188)	119 (94-153)
ray-grass anglais ⁽¹⁾	26	0.94 (0.84-1.07)	0.88 (0.80-1.01)	106 (83-129)	104 (91-122)
ray grass d'Italie ⁽¹⁾	26	0.89 (0.79-1.01)	0.83 (0.71-0.94)	113 (66-173)	106 (84-137)
ray-grass hybride ⁽²⁾	3	0.94 ±0.10	0.89 ±0.10	126 ±32	111 ±12
fétuque élevée ⁽³⁾	1	0.84	0.78	132	123
brome cathartique	1	0.99	0.95	139	111
kikuyu ⁽⁴⁾	8	0.76 (0.69-0.84)	0.70 (0.63-0.77)	120 (90-150)	110 (90-130)
chloris ⁽⁵⁾	1	0.63	0.52	72	73

(1) données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989 à la Plaine des Cafres (1600 m)

(2) données recueillies par Brunschwig en 1989 ; (3) Gilibert (1983)

(4) données recueillies par Bigot en 1989 à la ferme S.E.D.A.EL. (1000 m)

(5) Brunschwig (1991)

Il convient d'être prudent dans l'utilisation de ces valeurs, car elles ont été calculées à partir de différentes équations (§ 1.2.1.2.). Il serait nécessaire d'homogénéiser les modes de calcul avec la méthode de détermination utilisant la digestibilité à la pepsine cellulase (Aufrère *et al.*, 1988), maintenant applicable au laboratoire C.I.R.A.D. de La Réunion.

1.3.3. Aptitude à l'ensilage

Hormis la teneur en MS qui dépend de la dessiccation et que nous traiterons ultérieurement (§ 1.4.), l'aptitude à l'ensilage d'un fourrage est appréhendée par sa teneur en glucides solubles et son pouvoir tampon. Pour avoir une fermentation lactique suffisante, il faut une teneur en glucides solubles de 100 à 120 g kg⁻¹ MS et un pouvoir tampon le plus faible possible (Demarquilly, 1979).

1.3.3.1. Teneur en glucides solubles

Tableau 7 : Teneur en glucides solubles (GS) et le rapport moyen GS / MAT des différents fourrages produits dans les Hauts de La Réunion, avec l'âge moyen de repousse et la teneur en matières azotées totales (MAT) correspondants

espèce	nombre mesures	GS (g kg ⁻¹ MS)	GS extrêmes (g kg ⁻¹ MS)	GS / MAT	âge repousse (jours)	MAT (g kg ⁻¹ MS)
dactyle	41	34 ± 25	2 - 102	0.26	37 ± 13	179 ± 57
ray-grass anglais	40	67 ± 36	14 - 188	0.43	38 ± 13	176 ± 34
ray-grass d'Italie	37	90 ± 61	17 - 231	0.71	35 ± 13	172 ± 57
ray-grass hybride (1)	29	61 ± 25	24 - 106	0.46	33 ± 13	149 ± 40
brome (2)	4	76 ± 23	58 - 109	0.38	feuillu	201 ± 15
kikuyu	38	25 ± 8	10 - 40	0.18	46 ± 15	142 ± 30
chloris (3)	24	26 ± 10	10 - 49	0.36	30 ± 15	92 ± 29

(1) données de février à avril ; (2) données de septembre et octobre ; (3) données de février à mai

Tableau 8 : Teneur en glucides solubles (g kg⁻¹ MS), selon la saison, de *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne* et *Lolium multiflorum* récoltés entre 21 et 42 jours de repousse, à la Plaine des Cafres (1600 m), d'après les données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989

espèce	décembre à mars	avril mai	juin à septembre	octobre novembre	signif. F
dactyle	21.6 ^{ab}	31.5 ^b	12.4 ^a	52.8 ^c	*
ray-grass anglais	36 ^a	63 ^a	60 ^a	122 ^b	**
ray-grass d'Italie	50 ^a	79 ^a	60 ^a	173 ^b	***

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05

I.3.3.2. Pouvoir tampon

Tableau 9 : Pouvoir tampon (PT) mesuré en mg d'acide lactique 0.1N nécessaires pour abaisser 1g de MS de fourrage à pH 4, pour différents fourrages produits dans les Hauts de La Réunion, avec l'âge moyen de repousse et la teneur en matières azotées totales (MAT) correspondants

espèce	nombre de mesures	PT (mg g ⁻¹ MS)	PT extrêmes (mg g ⁻¹ MS)	âge repousse (jours)	MAT (g kg ⁻¹ MS)
dactyle	6	29.8 ± 2.0	25.2 - 36.6	-	106 ± 30
ray-grass anglais	5	42.7 ± 5.0	36.7 - 50.2	feuillu	208 ± 18
ray-grass hybride	21	63.1 ± 6.3	53.8 - 77.9	36 ± 12	131 ± 22
brome	5	47.5 ± 5.4	43.0 - 55.1	feuillu	201 ± 15
kikuyu	41	52.1 ± 13.4	22.1 - 84.7	40 ± 20	142 ± 30
chloris	23	36.1 ± 5.2	24.1 - 43.0	32 ± 14	92 ± 29

I.3.3.3. Commentaires sur l'aptitude à l'ensilage

Remarque préalable

Les teneurs en glucides solubles et les pouvoirs tampons donnés par Andrieu *et al.* (1986) correspondent à des graminées récoltées en début épiaison du 1^{er} cycle qui contient plus de glucides solubles (maximum à l'épiaison). De plus, le printemps en Auvergne est ensoleillé et froid (accumulation des glucides solubles). De ce fait, la comparaison avec nos données, présentée ci-après, est à nuancer.

Dactyle

A La Réunion, le dactyle présente une carence en glucides solubles (tableau 7). La variabilité importante de cette teneur est expliquée par la variation saisonnière (tableau 8) et le stade de repousse (Smith, 1973, *in* McDonald *et al.*, 1991). Andrieu *et al.* (1986) donne des teneurs plus élevées pour du dactyle en début épiaison récolté en Auvergne : GS = 80 g kg⁻¹ MS (50 à 100) ; des teneurs comparables ont été enregistrées en Ecosse (Henderson, 1973, *in* McDonald *et al.*, 1991). Comme dans la bibliographie (Waite *et al.*, 1953, *in* : McDonald *et al.*, 1991), deux périodes (fin d'été et surtout printemps) présentent des teneurs plus élevées (annexe B - fig. B1 - p 27) le rendant plus apte à l'ensilage (tableau 8). En effet, la durée d'insolation est favorable à l'accumulation des glucides solubles (Smith, 1973, *in* McDonald *et al.*, 1991 ; Isselstein, 1993). Un apport important de sucres solubles (60 à 100 g kg⁻¹ MS) est donc nécessaire avec des quantités de mélasse pouvant être modulées de 25 à 35 kg par balle enrubannée (150 à 220 kg de MS selon l'espèce, le stade et la teneur en MS) en fonction de la saison et du stade de végétation (Paillat, 1994) (annexe B - pp 43-44).

Deux localisations de mesures du pouvoir tampon donnent des valeurs différentes, essentiellement en liaison avec le stade du fourrage : riche en feuilles à l'automne à la Plaine des Cafres (PT = 36.3 mg g⁻¹ MS), pleine épiaison en novembre à la Plaine des Palmistes (PT = 26.6 mg g⁻¹ MS). En effet, le pouvoir tampon est lié négativement à la teneur en cellulose brute (Andrieu *et al.*, 1986). Ces valeurs sont très faibles (tableau 9), comparées à celles données par Andrieu *et al.* (1986) : PT = 85 mg g⁻¹ MS (70 à 95). Il semble que la teneur en CB plus élevée et les teneurs en MAT et en cendres plus faibles, permettent de relativiser cette différence. McDonald *et al.* (1962) rapporte des valeurs comparables à celles de La Réunion : PT = 30 et 40 mg g⁻¹ MS avec MAT = 75 et 150 g kg⁻¹ MS, respectivement. La résistance du dactyle de La Réunion à l'acidification est donc faible, surtout pour des stades tardifs.

Compte tenu de la liaison positive entre le pouvoir tampon et la teneur en MAT (McDonald, 1962), le rapport GS / MAT peut constituer un indicateur d'aptitude à l'ensilage. Ce rapport, en moyenne égal à 0.26, est inférieur à celui donné par Lefebvre *et al.* (1967) pour du dactyle en métropole. D'après les données de Demarquilly (1980) et Andrieu (1986), ce rapport serait de 0.45. L'aptitude à l'ensilage du dactyle à La Réunion est donc faible et variable suivant l'âge et la saison, la période la plus favorable étant d'octobre à décembre. Par ailleurs, la teneur en MS à la fauche souvent faible, notamment en été, rend l'ensilage en coupe directe difficile. Sans apport de conservateurs, un préfannage est nécessaire pour bien conserver l'ensilage.

Ray-grass anglais

La teneur en glucides solubles est plus faible qu'en métropole (tableau 7) : Andrieu *et al.* (1986) donne une teneur variant entre 120 et 200 g kg⁻¹ MS (150 en moyenne) pour du ray-grass anglais récolté à l'apparition des épis du 1^{er} cycle de végétation dans le Massif Central. Elle atteint en moyenne 170 g kg⁻¹ MS (50 à 310) en Ecosse (Henderson, 1973, *in* McDonald *et al.*, 1991). A La Réunion, elle est significativement différente selon la saison (tableau 8) : comme pour le dactyle, le printemps (octobre - novembre) se démarque nettement avec 120 g kg⁻¹ MS en moyenne, ce qui est suffisant pour réaliser un ensilage sans apport de mélasse. Contrairement au dactyle, seul le printemps est plus favorable à l'accumulation de glucides solubles (annexe B - fig. B2 - p 30) (Waite *et al.*, 1953, *in* : McDonald *et al.*, 1991). En outre, il existe une variabilité inter-annuelle et inter-site qui n'a pu être prise en compte par l'exploitation des résultats de Brunschwig (1988 -1989). La teneur en glucides solubles, non négligeable, permet donc d'envisager un apport de mélasse plus faible que pour le dactyle (Paillat, 1994) (annexe B - pp 43-44). Cet apport peut être modulé suivant les périodes : apport de 25 kg par balle le plus souvent et apport réduit en octobre - novembre (5 à 10 kg par balle).

Les valeurs du pouvoir tampon (tableau 9) sont deux fois plus faibles qu'en Auvergne : PT = 42.7 mg g⁻¹ MS au lieu de 90 mg g⁻¹ MS (Andrieu *et al.*, 1986). Les plus faibles teneurs en matières minérales et en acides organiques du RGA cultivé à La Réunion pourraient expliquer le pouvoir tampon plus faible. Le ray-grass anglais est cependant plus difficile à acidifier que le dactyle. Ces valeurs sont plus proches de celles rapportées par McDonald *et al.* (1962) : PT = 31 mg g⁻¹ MS mais pour du RGA pauvre en azote (MAT < 100 g kg⁻¹ MS).

Le rapport GS / MAT de 0.43 en moyenne, pour un ray-grass anglais exploité à 35 jours, est plus élevé que celui du dactyle. On peut dire que son aptitude à l'ensilage est meilleure, mais seulement comparable à un dactyle de métropole. Selon les données de Demarquilly (1980) et Andrieu (1986), le rapport GS / MAT du RGA est de 0.97. La remarque sur la teneur en MS faite à propos du dactyle vaut également pour le ray-grass anglais.

Ray-grass d'Italie

Comme pour les autres graminées, la teneur en glucides solubles (tableau 7) est beaucoup plus faible qu'en Europe : GS = 170 g kg⁻¹ MS (150 à 200) selon Andrieu *et al.* (1986), GS = 180 g kg⁻¹ MS (70 à 310) selon Henderson (1973, *in* McDonald *et al.*, 1991). Elle est très variable selon la saison et satisfaisante pour l'ensilage uniquement au printemps (tableau 8) (annexe B - fig. B3 - p 33). Compte tenu de la grande variabilité de cette richesse à La Réunion, un apport de mélasse, même plus réduit, s'avère nécessaire : il est en effet très difficile de prédire le déficit en glucides solubles sans en faire l'analyse. En dehors du printemps, un apport de 20 kg de mélasse par balle doit être envisagé (Paillat, 1994) (annexe B - pp 43-44).

Le pouvoir tampon, non mesuré, doit être proche de celui du ray-grass hybride. Andrieu *et al.* (1986) donne en effet un pouvoir tampon du RGI supérieur à celui du RGA. Le rapport GS / MAT est très variable : de 0.08 à 3.09. L'aptitude à l'ensilage, décrite par ce rapport est bonne : GS / MAT = 0.71 pour un RGI exploité à 42 jours. Selon les données de Demarquilly (1980) et Andrieu (1986), ce rapport pour la métropole est de 1.15 environ. Le ray-grass d'Italie est particulièrement riche en eau. L'ensilage en coupe directe est à proscrire. Un ressuyage important est nécessaire.

Ray-grass hybride

Compte tenu de la période concernée, de décembre à mai, la teneur en glucides solubles du ray-grass hybride (tableau 7) se situe entre celle du RGA et celle du RGI. Sur l'année, sa teneur moyenne doit se situer autour de 80 g kg⁻¹ MS. Un apport de 25 kg de mélasse par balle est nécessaire sauf éventuellement au printemps (Paillat, 1994) (annexe B - pp 43-44).

Le pouvoir tampon mesuré sur ray-grass hybride (tableau 9) est le plus élevé des graminées étudiées. Cependant, il reste faible par rapport aux données métropolitaines (Andrieu *et al.*, 1986). A un stade comparable, le rapport GS / MAT de 0.46 (0.11 à 1.01) est voisin de celui du ray-grass anglais.

Fétuque élevée

En l'absence de mesures, nous pouvons penser que la teneur en glucides solubles de la fétuque élevée est légèrement supérieure à celle du dactyle. Selon l'I.N.R.A. (Andrieu *et al.*, 1986), la fétuque présente une teneur de 100 g kg⁻¹ MS (80 à 120) et le dactyle de 80 g kg⁻¹ MS (50 à 100). Vu la pauvreté en glucides solubles observée dans les fourrages de La Réunion, et par comparaison au dactyle, cette teneur se situerait vers 45 g kg⁻¹ MS pour la fétuque.

Brome

Etant donné la période à laquelle ont été faites les mesures (tableau 7), il semble que la richesse en glucides solubles soit assez proche de celle du ray-grass anglais, c'est à dire 65 g kg^{-1} MS environ, en moyenne sur l'année. Le pouvoir tampon du brome est également proche de celui du ray-grass anglais, il est donc assez facile à acidifier. Comme pour les autres fourrages, il tend à diminuer avec l'âge et l'augmentation de la teneur en cellulose brute : $\text{PT} = 50$ et 43 mg g^{-1} MS pour les stades feuillu et début épiaison, respectivement. Le rapport GS / MAT est égal à 0.38 (0.31 à 0.58). Le brome est une plante bien adaptée à l'ensilage (A.C.T.A., 1987). Son aptitude à l'ensilage est proche de celle du ray-grass anglais, mais il est beaucoup plus adapté à la fauche et résiste mieux à la sécheresse.

Kikuyu

Les faibles teneurs en glucides solubles du kikuyu (tableau 7) sont explicables par sa nature tropicale favorisant l'accumulation d'amidon plutôt que celle des glucides solubles (Wilkinson, 1983, *in* McDonald *et al.*, 1991). D'après Gilibert (1983), les stolons seraient plus riches en glucides solubles. D'après les données de Mandret (non publiées), la teneur semble peu varier selon l'âge du kikuyu et la saison (teneur un peu plus élevée à partir de mai), mais des mesures complémentaires seraient nécessaires. Par ailleurs, l'altitude joue probablement un rôle. La teneur en glucides solubles du kikuyu est donc beaucoup trop faible pour assurer une fermentation correcte de l'ensilage. Ce déficit important (80 à 100 g kg^{-1} MS) nécessite un apport de 30 à 35 kg de mélasse par balle (annexe B - pp 43-44).

S'agissant du pouvoir tampon, certaines mesures contrastées ont été obtenues dans les Hauts de l'Ouest ($\text{PT} = 50.2 \text{ mg g}^{-1}$ MS) et à la Plaine des Cafres ($\text{PT} = 25 \text{ mg g}^{-1}$ MS) avec des teneurs en MAT comparables. L'âge moyen de repousse pourrait expliquer ces différences. En effet, la teneur en cellulose brute augmente avec l'âge et elle est plus élevée en fin d'été (mesures de la Plaine des Cafres) qu'en fin d'hiver (mesures des Hauts de l'Ouest). Les valeurs du pouvoir tampon sont faibles (tableau 9) comparativement aux données de l'I.N.R.A. sur des fourrages d'Auvergne (Andrieu *et al.*, 1986), mais elles sont parmi les plus élevées des valeurs mesurées. Le kikuyu est parmi les fourrages de La Réunion les plus difficiles à acidifier.

Comparé aux données sur dactyle (Lefebvre *et al.*, 1967), Le rapport GS / MAT reste toujours faible (en moyenne 0.18) : de 0.09 à 0.33 selon l'âge de repousse (15 à 110 j). L'aptitude à l'ensilage du kikuyu est donc mauvaise quel que soit l'âge. De plus, la teneur en MS à la fauche souvent faible, notamment en été, rend l'ensilage en coupe directe difficile. Un ressuyage ou un préfannage seront nécessaires.

Chloris

La teneur moyenne en glucides solubles est de 26 g kg^{-1} MS, pour du chloris produit en zone littorale. Elle est voisine de celle du kikuyu (tableau 7). En relation avec sa teneur en MAT faible, le pouvoir tampon du chloris est faible (tableau 9). Le rapport GS / MAT est égal à 0.36 (0.11 à 0.61). Le chloris peut donc s'ensiler assez facilement en apportant une quantité de mélasse suffisante (25 à 35 kg par balle) (annexe B - pp 43-44).

I.3.4. Conclusion sur l'aptitude à l'ensilage

Les résultats obtenus à La Réunion depuis une dizaine d'années montrent que les différences climatiques agissent sur les caractéristiques alimentaires des fourrages. Il serait cependant utile de compléter cette connaissance. Une étude de l'évolution de la composition chimique des fourrages, suivant l'âge, la saison, l'altitude, les conditions climatiques, notamment avec l'ennuagement fréquent (Isselstein, 1993ab), prenant en compte plusieurs localisations (Ouest et Sud), pourrait répondre, en partie, aux différences de performances de production et de reproduction des animaux observées sur l'année (Lanot, 1993).

Les conditions de végétation propres au climat tropical, mais avec des températures atténuées par l'altitude, modifient la répartition des constituants de la matière sèche : un même fourrage cultivé en altitude à La Réunion ou en métropole ne présente pas les mêmes caractéristiques, s'agissant notamment de la résistance à l'acidification et de la teneur en glucides solubles, éléments importants pour qualifier l'aptitude à l'ensilage.

Tableau 10 : Classement de l'aptitude à l'ensilage des graminées étudiées, en prenant comme références (I.N.R.A.) le RGI, le dactyle et la luzerne cultivés en métropole

aptitude ensilage	très mauvaise	mauvaise	médiocre	passable	moyenne	bonne	très bonne
espèces	kikuyu	dactyle	chloris fétuque	brome RGA RGH	RGI		
	luzerne (I.N.R.A.)		dactyle (I.N.R.A.)				RGI (I.N.R.A.)

Aucun des fourrages n'est très facile à ensiler (tableau 10). En effet, comparées aux données d'Europe (Andrieu *et al.*, 1986 ; McDonald *et al.*, 1962), les teneurs en glucides solubles sont beaucoup plus faibles et sont très variables : il y a autant de variations entre saisons qu'entre espèces ; seul le printemps (octobre - novembre) serait plus favorable. Les températures élevées ainsi que l'ennuagement important sont vraisemblablement à l'origine de ces faibles teneurs (Isselstein, 1993ab). Par contre, comparée aux données de métropole (Andrieu *et al.*, 1986), la résistance à l'acidification mesurée par le pouvoir tampon est faible.

La réussite de l'ensilage à La Réunion dépend donc de l'apport de sucres solubles. De la qualité de la répartition de la mélasse dans la masse du fourrage dépend la bonne fermentation du fourrage. La quantité de mélasse à épandre doit être ajustée au fourrage, à la saison, à la teneur en MS et au rendement fourrager. Pour garantir une fermentation adéquate tout en limitant le coût, des abaques de calcul (Paillat, 1994) (annexe B - pp 43-44), prenant en compte ces différents paramètres, peuvent aider les techniciens et éleveurs. La teneur en MS est souvent faible. Un ressuyage est donc nécessaire pour ensiler correctement ces fourrages. Mais, compte tenu des conditions climatiques souvent défavorables en période d'ensilage, le ressuyage reste modéré et un apport de conservateurs acides permettrait de mieux préserver les qualités nutritionnelles des fourrages ensilés, le ressuyage permettant cependant de limiter les pertes dans les jus.

I.4. Conditions de dessiccation du fourrage

I.4.1. Caractéristiques météorologiques des principales régions d'élevage

I.4.1.1. Pluviométrie

Etudiée sur une période de plus de vingt ans, la pluviométrie est très différente selon les régions concernées (figure 6). Les régions Hauts de l'Ouest, Plaine des Cafres (côte sous le vent) et Plaine des Palmistes (côte au vent) reçoivent en moyenne 1535, 2266 et 4721 mm d'eau par an, respectivement. Pour les Hauts du Sud (plateau de Grand-Coude), les courbes isohyètes (figure 3 - p 22) montrent une pluviométrie d'environ 3500 mm d'eau par an.

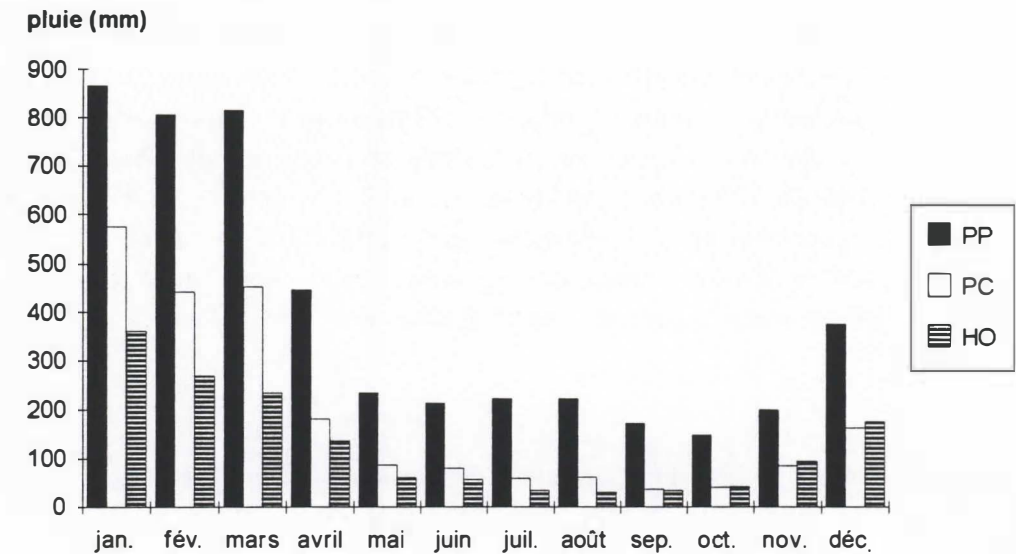


Figure 6 : Répartition des pluies (moyenne sur 20 ans) au cours de l'année pour trois régions d'élevage : Plaine des Palmistes (PP), Plaine des Cafres (PC) et Hauts de l'Ouest (HO)

Quelle que soit la région, les variations mensuelles sont comparables avec 70 à 80 % des pluies en période cyclonique (55 à 65 % sur les 3 premiers mois de l'année). La Plaine des Palmistes présente la meilleure répartition des pluies et la Plaine des Cafres la plus mauvaise. Les risques de pluies et donc les difficultés de séchage, sont dépendants de ces régimes hydriques. La région la plus défavorisée de ce point de vue est la Plaine des Palmistes.

L'analyse des fréquences de pluie (annexe B - p 45) donne plus de précisions sur la faisabilité et la durée possible de la dessiccation du fourrage. Les périodes favorables à la dessiccation (séquences de 3 jours sans pluie) sont de courte durée durant la période observée (novembre à mai), le mois de février étant le plus défavorable. Cependant, des nuances sont à apporter selon chacune des régions.

Pour la Plaine des Palmistes, seuls les mois de novembre et mai sont très favorables ou favorables à une dessiccation, le mois de décembre est juste favorable, les mois de janvier à avril sont défavorables à très défavorables. Pour la Plaine des Cafres et les Hauts de l'Ouest, seul le mois de février est juste favorable, les autres mois sont favorables à très favorables. L'analyse des séquences de 4 jours sans pluie montre que la dessiccation dans les Hauts de l'Ouest peut être prolongée. Malgré les aléas climatiques, le séchage du fourrage est donc envisageable pour permettre la récolte en balles enrubannées. La dessiccation à la Plaine des Palmistes devra être rapide (1 à 2 jours) durant la saison cyclonique (décembre à avril), en évitant les récoltes en février et mars. Dans les autres régions, le risque de pluie est moindre, une dessiccation de 2 à 3 jours est envisageable, en évitant toutefois de récolter en février.

I.4.1.2. Conditions d'évaporation de l'eau du fourrage

Plusieurs modèles de dessiccation du fourrage (Thompson, 1981 ; McGechan, 1990a) font appel à l'E.T.P.. Notre propos n'est pas d'utiliser ces modèles en tant que prévision des conditions de séchage (l'extrapolation aux conditions du climat tropical d'altitude de La Réunion serait hasardeuse), ni de modéliser la dessiccation du fourrage à La Réunion (les variabilités liées aux fourrages et aux conditions climatiques nécessiteraient de nombreuses expérimentations et une meilleure connaissance des micro-climats). Nous nous attacherons plus simplement à comprendre les différences climatiques régionales pour déterminer les périodes les plus favorables à la dessiccation nécessaire à l'ensilage en balles enrubannées. La formule de l'E.T.P. (Penman, 1948, *in* : Chamayou, 1984) fait apparaître un terme radiatif avec, entre autre, le rayonnement net solaire et la température, et un terme advectif avec, entre autre, l'humidité et la température de l'air, ainsi que le vent. Nous allons donc approcher la dessiccation potentielle du fourrage à partir de ces caractéristiques climatiques.

Insolation

L'insolation de la Plaine des Cafres est beaucoup plus importante que celle des Hauts de l'Ouest, 2265 et 1391 heures par an, respectivement. Dans cette dernière région, les prairies se situent dans la zone de moindre insolation (1100 à 1400 m d'altitude). Selon Généré (1989), les brouillards d'origine orogénique apparaissent pratiquement chaque après-midi, compromettant ainsi la dessiccation du fourrage. A la Plaine des Palmistes (1633 heures par an), l'insolation moyenne quotidienne est diminuée par la fréquence des pluies ; cependant, les jours sans pluie peuvent bénéficier d'une durée d'insolation importante.

Les variations en cours d'année (annexe B - p 45), montrent une stabilité de la durée d'insolation à la Plaine des Palmistes : la période de décembre à février est un peu plus ensoleillée (durée du jour). A la Plaine des Cafres, les fortes insolation de août à novembre sont remarquables et expliquent la richesse en glucides solubles des fourrages à cette période qui, par ailleurs, reste fraîche compte tenu de l'altitude (1550 m). Le démarrage de végétation est notable à cette même période si la pluviométrie est suffisante. Dans les Hauts de l'Ouest, l'insolation est maximale d'avril à août et minimale d'octobre à décembre. Le démarrage de végétation au printemps est lent, phénomène accentué par le manque d'eau : les premières coupes d'ensilage n'ont souvent lieu qu'en janvier.

La proportion d'ensoleillement du matin (de 0 à 12 h) est de 57 %, 69 %, 76 % pour la Plaine des Cafres, la Plaine des Palmistes et les Hauts de l'Ouest, respectivement. La durée d'insolation du matin est peu différente d'une région à l'autre (variation de 20 %) ; par contre, il y a trois fois plus d'ensoleillement l'après-midi à la Plaine des Cafres (160 min) que dans les Hauts de l'Ouest (55 min). La dessiccation du fourrage est donc surtout assurée par l'insolation matinale, notamment dans les Hauts de l'Ouest. Il est préférable d'effectuer la fauche en fin de journée, de manière à réaliser le fanage ou le retournement des andains très tôt le lendemain.

Rayonnement global

Le rayonnement apporte l'énergie nécessaire à la dessiccation en augmentant la température de l'air. La différence de température créée entre le bas et le dessus de l'andain permet le transfert de l'eau du fourrage vers l'air ambiant si celui-ci n'est pas saturé (Thompson, 1981). L'action directe du rayonnement sur le fourrage n'est vraiment efficace qu'à la surface de l'andain, d'où la nécessité du fanage (Jones *et al.*, 1980). Les différences régionales, constatées pour l'insolation, sont comparables pour le rayonnement global : 18.2, 13.9, 11.3 MJ m⁻² pour la Plaine des Cafres, la Plaine des Palmistes et les Hauts de l'Ouest, respectivement. Le profil des courbes d'insolation (annexe B - p 45) et de rayonnement (figure 7) est différent : les effets de la position du soleil et de l'altitude compensent l'effet de la durée d'insolation. Les courbes de rayonnement permettent de définir la période de septembre à janvier comme la plus propice à la dessiccation, ainsi que les mois de février et mars pour les Hauts de l'Ouest.

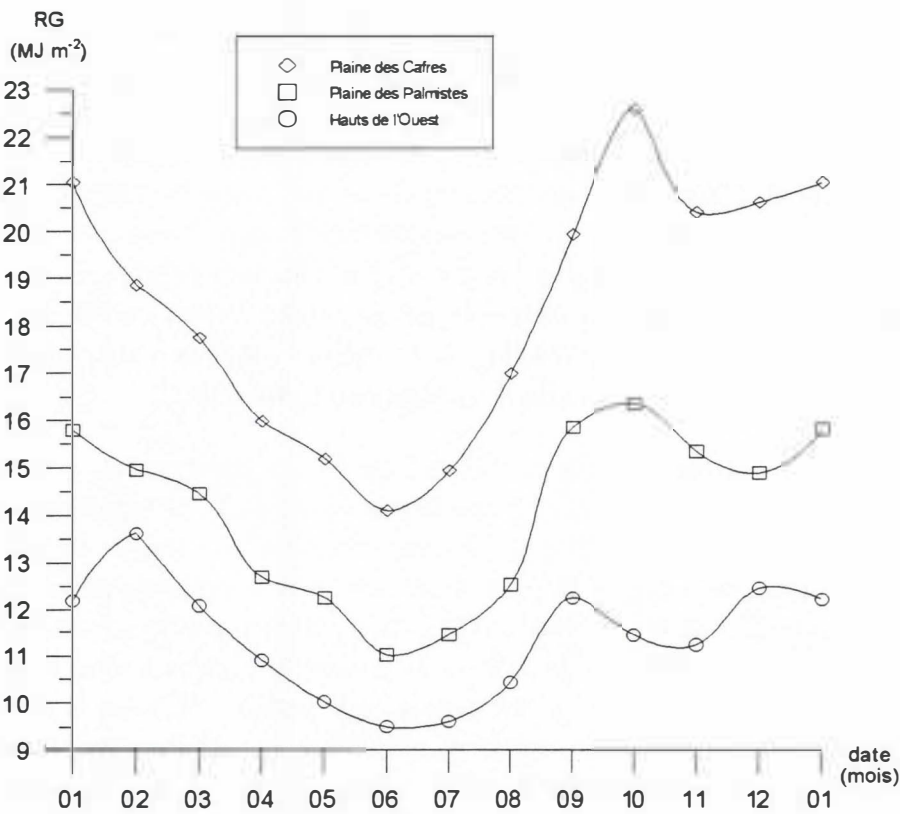


Figure 7 : Rayonnement global moyen quotidien (RG) en fonction du mois pour trois régions (période 1987 - 1991 pour la Plaine des Palmistes et les Hauts de l'Ouest et 1984 - 1991 pour la Plaine des Cafres)

Températures

La température (annexe B - p 46) dépend de la saison, en relation avec le rayonnement solaire, avec un minimum en août et un maximum en février, mais également de l'altitude : moyenne annuelle de 16.3, 15.3 et 13.4 °C à la Plaine des Palmistes (1025 m), dans les Hauts de l'Ouest (1105 m) et à la Plaine des Cafres (1550 m), respectivement. Les courbes des températures maximales (annexe B - p 46), montrent une élévation plus importante des températures en octobre à la Plaine des Cafres : les températures maximales sont alors aussi élevées que celles enregistrées dans les Hauts de l'Ouest à une altitude inférieure de 450 m. L'insolation importante constatée à cette période pour la Plaine des Cafres en est la cause vraisemblable, ce qui confirme une amélioration nette des conditions de végétation et de dessiccation du fourrage, à cette période, pour cette région de haute altitude.

Humidité et déficit de saturation

L'humidité atmosphérique, avec la température, conditionne le pouvoir évaporant de l'air (terme advectif de la formule d'E.T.P.). Dans les Hauts de La Réunion, sa moyenne annuelle est très élevée : 85 % à 600 m et plus de 90 % entre 1000 et 1500 m (Génére, 1989). La présence de brouillards sur les reliefs est la cause de cette humidité très élevée. En conséquence, le déficit de saturation de l'air (Luder, 1974, 1982, *in* : Cabon, 1987 ; Höhn, 1988 ; Casagrande, 1991) est très faible, ce qui limite fortement les possibilités de dessiccation du fourrage.

Considérant une humidité relative moyenne de 90 %, le déficit de saturation horaire moyen, calculé avec la formule de Bosen (1960, *in* : Casagrande, 1991), serait de l'ordre de 1.2 à 1.4 g d'eau par m³ d'air avec les températures moyennes rencontrées dans les Hauts (13.3 à 16.3 °C). Dans des conditions climatiques assez semblables, reproduites expérimentalement sur du fourrage en couche fine, Lamond *et al.* (1993ab) donne une humidité d'équilibre du fourrage avec l'air à 75 % de MS, caractérisant ainsi la limite de dessiccation. La somme journalière des déficits de saturation serait de 28 à 33 g m⁻³ h. Cette valeur est faible comparée aux conditions de séchage des foin en Europe : en montagne Suisse, Höhn (1988) donne des valeurs de l'ordre de 90 à 100 g m⁻³ h, Luder (1974, *in* : Demarquilly, 1987) donne la valeur d'environ 70 g m⁻³ h, soit deux à trois fois plus que dans les Hauts de La Réunion.

D'après les résultats d'essais de Casagrande (1991), dans la région du Centre de la France, de la fétuque élevée jeune récoltée à une teneur en MS de 29 % requiert une somme de déficit de saturation de l'ordre de 140 g m⁻³ h pour atteindre une teneur en MS de 80 %, nécessaire à la stabilité du foin. La fétuque étant une plante présentant une dessiccation particulièrement rapide (Jones *et al.*, 1980, 1981 ; Demarquilly, 1987), en raison du nombre important de stomates à la surface des feuilles, de la proportion feuilles - tiges et de l'efficacité de l'évaporation de l'eau des tiges par les limbes, les valeurs données par Casagrande, comparées au potentiel de dessiccation estimé pour La Réunion, montrent les difficultés de la fenaison dans les Hauts, d'autant plus que la teneur en MS à la fauche est inférieure à 20 %.

Cependant, compte tenu de la rapidité de perte d'eau en début de dessiccation (phase rapide définie par Jones en 1979), le ressuyage (25 à 30 % de MS) ou le préfanage (30 à 40 % de MS), voire parfois le mi-fanage (40 à 50 % de MS), réalisés sur une à deux journées, sont compatibles avec le pouvoir évaporant de l'air des Hauts de l'île, en l'absence de pluies bien entendu. L'ensilage en balles cylindriques peut être envisagé ; par contre, la fenaison est fortement compromise : pour de la fétuque élevée, dans le Centre de la France, Casagrande (1991) donne une somme de déficit de saturation de 20 g m⁻³ h pour passer de 29 à plus de 50 % de MS et de 120 g m⁻³ h supplémentaires pour atteindre ensuite 80 % de MS.

Vents

Le vent intervient dans la dessiccation, car il permet d'évacuer plus rapidement l'air saturé dans et autour de l'andain (Jones *et al.*, 1980). La vitesse des vents est très différente dans les régions étudiées : vents forts à la Plaine des Cafres (NE principalement), très faibles dans les Hauts de l'Ouest (E - SE principalement), intermédiaires à la Plaine des Palmistes (SO et NE principalement). A la Plaine des Cafres, 51 % des vents sont supérieurs à 10 km h⁻¹, avec une proportion plus élevée de vents forts le matin. A la Plaine des Palmistes, 40% des vents sont inférieurs à 5 km h⁻¹ et 40 % sont compris entre 5 et 10 km h⁻¹, avec une proportion plus élevée de vents forts l'après-midi. Dans les Hauts de l'Ouest, 69 % des vents sont inférieurs à 5 km h⁻¹ et seulement 3 % des vents sont supérieurs à 10 km h⁻¹, avec une égale répartition matin et après-midi. Dans l'année (annexe B - p 46), on constate peu de variations dans la répartition des vents : augmentation des vents faibles à la Plaine des Cafres de avril à juin et en novembre - décembre, augmentation des vents forts à la Plaine des Palmistes de juin à septembre.

I.4.2. Dessiccation du fourrage

Le niveau de préfanage atteint conditionne la qualité de l'ensilage réalisé : pour les balles enrubannées, il faut viser 40 % de MS au minimum (Andrieu *et al.*, 1990 ; Morel d'Arleux, 1993). L'objectif des suivis de dessiccation est de cerner les conditions de séchage pouvant varier suivant le fourrage (Jones *et al.*, 1980, 1981), le réglage des matériels (Cabon, 1987 ; Gaillard, 1987) et les sites avec des caractéristiques météorologiques diverses.

I.4.2.1. Suivis de dessiccation sur des chantiers en 1990 et 1991

Les suivis des chantiers réalisés en 1990 ont montré que les intensités de séchage pouvaient être très variables : de 8 à 2445 kg d'eau h⁻¹ ha⁻¹. Les variations de la teneur en MS vont de 0 à 36 points de MS sur toute la durée de dessiccation. Les évolutions les plus faibles sont constatées dans les Hauts de l'Ouest et les plus importantes à la Plaine des Palmistes (Paillat *et al.*, 1990). Avec des conditions ensoleillées et du vent, des variations de 10 points de MS par heure ont été notées à la Plaine des Palmistes sur de la fétuque peu dense.

La teneur en MS à la récolte est bien sûr dépendante des conditions de séchage exprimées à travers le gain de MS ($r^2 = 0.76$, $p < 0.001$), alors que la teneur en MS à la fauche n'intervient pas ($r^2 = 0.15$, $p > 0.01$). Elle varie positivement avec l'intensité horaire de séchage ($r^2 = 0.53$, $p < 0.001$), et négativement avec le rendement fourrager ($r^2 = 0.57$, $p < 0.001$). Les conditions météorologiques (tableau 12) jouent un rôle important ($r^2 = 0.47$, $p < 0.01$). Le gain de MS est expliqué positivement par l'intensité horaire de séchage ($r^2 = 0.58$, $p < 0.001$), alors que la quantité d'eau évaporée par hectare est déterminée négativement par la teneur en MS à la fauche ($r^2 = 0.72$, $p < 0.001$) et positivement par le rendement fourrager ($r^2 = 0.37$, $p < 0.01$).

Dans l'analyse factorielle des correspondances multiples (annexe B - fig. B12 - p 47), la région Hauts de l'Ouest se situe avec les mauvaises conditions de dessiccation, alors que la Plaine des Palmistes se situe avec les bonnes conditions. L'analyse de quelques caractéristiques de dessiccation (tableau 11) montre ces différences régionales. Dans les Hauts de l'Ouest, il est nécessaire de prolonger le séchage, de choisir plutôt des fourrages tempérés - la fétuque présenterait un intérêt compte tenu de sa rusticité et de son aptitude à la dessiccation - et de récolter au stade feuillu avec un rendement fourrager plus faible.

Tableau 11 : Dessiccation du fourrage dans les trois régions étudiées en 1990 et 1991

caractéristiques de dessiccation	Hauts de l'Ouest	Plaine des Cafres	Plaine des Palmistes	signif. F
teneur en MS à la récolte (%)	22.4 ^a	31.3 ^b	33.9 ^b	**
gain de MS (%) ⁽¹⁾	4.6 ^a	15.0 ^b	15.1 ^b	**
en 1990, intensité (% MS h ⁻¹)	0.6	2.4	2.4	ns
quantité d'eau évaporée (kg ha ⁻¹) ⁽¹⁾	3009 ^a	10613 ^b	8338 ^b	***
en 1990, intensité (kg d'eau h ⁻¹ ha ⁻¹)	391	1200	566	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil $p < 0.05$

(1) = concernant toute la période de dessiccation, sans tenir compte de la durée de dessiccation

Les conditions climatiques (tableau 12) influencent significativement le gain de MS et donc la teneur en MS à la récolte. Les conditions "couvert" ou "pluvieux" se distinguent nettement des conditions "beau" et "nuageux".

Tableau 12 : Dessiccation du fourrage selon les conditions climatiques en 1990 et 1991

caractéristiques de dessiccation	beau	nuageux	couvert	pluvieux	signif. F
teneur en MS à la fauche (%)	18.9	17.5	18.6	13.8	ns
teneur en MS à la récolte (%)	35.3 ^c	29.1 ^{bc}	23.1 ^{ab}	17.5 ^a	**
gain de MS (%) ⁽¹⁾	16.4 ^b	11.5 ^{ab}	4.5 ^a	3.8 ^a	*
en 1990, intensité (% MS h ⁻¹)	3.7	1.4	0.5	0.0	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil $p < 0.05$

(1) = concernant toute la période de dessiccation, sans tenir compte de la durée de dessiccation

La saison (tableau 13) n'apparaît pas déterminante dans la dessiccation du fourrage. Il y a une corrélation significative entre les régions et la saison ($r^2 = 0.37$, $p < 0.01$), il est alors difficile de distinguer l'influence de la saison de celle des caractéristiques régionales.

Tableau 13 : Dessiccation du fourrage selon la saison en 1990 et 1991

caractéristiques de dessiccation	janvier à mars	avril - mai	juin à août	signif. F
teneur en MS à la fauche (%)	16.1	17.7	19.1	ns
teneur en MS à la récolte (%)	30.3	22.9	32.3	ns
gain de MS (%) ⁽¹⁾	14.2 ^b	5.2 ^a	13.1 ^b	*
quantité d'eau évaporée (kg ha ⁻¹) ⁽¹⁾	9367	3937	7080	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil $p < 0.05$

(1) = concernant toute la période de dessiccation, sans tenir compte de la durée de dessiccation

L'analyse factorielle des correspondances multiples (annexe B - fig. B13 - p 47) permet d'aborder ces interactions. Chacune des variables intervenant dans la réalisation des chantiers d'ensilages a été transformée en deux modalités opposées. Outre les variables intervenant dans le coût de l'ensilage (objet de la quatrième partie), il est possible de mettre en évidence d'autres regroupements : une teneur en MS faible à la récolte, correspond à un stade de récolte tardif et à des conditions pluvieuses, à l'opposé, une teneur en MS élevée correspond à un temps ensoleillé, un stade précoce et à une proportion d'espèces tempérées supérieure à 50 %. Conditions météorologiques et performances de dessiccation ne sont pas vraiment liées à la saison de récolte (variable date), ce qui confirme l'analyse de variance du tableau 13.

I.4.2.2. Etude de quelques facteurs influençant la dessiccation

Dans ce paragraphe, les données météorologiques correspondent à des moyennes, minimum ou maximum journaliers de la station Météo-France la plus proche du lieu d'essai. Elles sont données à titre indicatif pour situer les conditions générales de dessiccation. Nous n'avons pas pu disposer de station météorologique sur le lieu d'essai avec des enregistrements horaires qui auraient permis, entre autre, de calculer les déficits de saturation (Höhn, 1988). Outre l'évolution de la teneur en MS, la caractéristique la plus accessible est l'intensité horaire de dessiccation en points de MS. La comparaison des intensités moyennes durant le séchage permet d'étudier divers facteurs : hauteur de coupe, rendement, densité des andains, conditionnement. Cette comparaison n'est valable qu'à l'intérieur d'un essai, la mise en parallèle des essais n'étant possible qu'à partir des cinétiques de dessiccation (annexe B - p 48).

Stade du fourrage

Les essais mis en place n'ont pas permis de cerner l'influence du stade sur la dessiccation car les rendements fourragers différaient beaucoup trop. Dans l'analyse factorielle des correspondances multiples (annexe B - fig. 13 - p 47), une teneur en MS à la récolte élevée correspond à un stade précoce, mais également à des conditions climatiques ensoleillées.

Rendement fourrager et densité d'andain

Le rendement fourrager peut être approché de plusieurs façons : le rendement en vert (RFV) qui intervient surtout sur la quantité d'eau à évaporer à l'hectare, le rendement en sec (RFS), et le rendement (MS) équivalent en andain (REA), qui correspond le plus à la densité du fourrage (quantité de MS de fourrage rapportée à la surface occupée par l'andain) au cours de la dessiccation (Casagrande, 1991) et qui permet d'apprécier les réglages des machines.

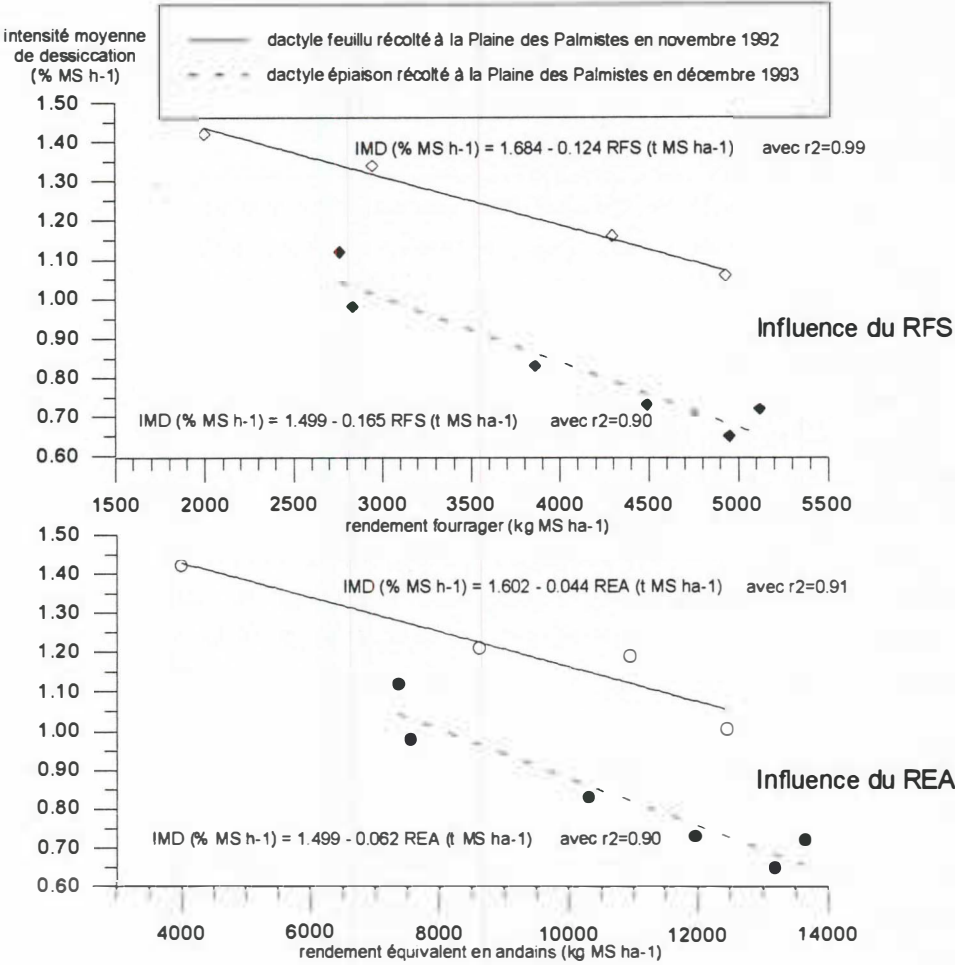


Figure 8 : Influence du rendement fourrager (RFS) sur l'intensité moyenne de dessiccation (IMD) de *Dactylis glomerata* dans deux conditions différentes

Figure 8 bis : Influence du rendement équivalent en andains (REA)

La différence dans les stades de récolte peut expliquer la moins bonne dessiccation du fourrage en 1993 pour des REA identiques (figure 8 bis) : le fourrage au stade épiaison se sèche moins rapidement qu'au stade feuillu (Jones, 1989 ; Casagrande, 1991). De plus, les conditions climatiques diffèrent entre les deux essais relatés : la température moyenne a été légèrement supérieure et l'humidité relative très inférieure en novembre 1992, par contre, le vent a été légèrement plus important en décembre 1993. Ces données moyennes conduisent à un déficit de saturation moyen de 3 et 1.3 g m⁻³ en 1992 et 1993, respectivement, d'où une dessiccation moins rapide et plus dépendante du rendement en 1993. La somme des déficits moyens de saturation sur toute la période de séchage est de 139 et 34 g m⁻³ h et les teneurs en MS moyennes atteintes sont de 75 et 48 %, en 1992 et 1993, respectivement.

Pour des rendements en sec identiques (tableau 14), la variation de la largeur de l'andain induit des différences de densité de fourrage (REA) qui conduisent à des intensités de séchage différentes. Les andains doivent être le plus large possible afin de diminuer la densité et capter davantage de rayonnement solaire, ceci d'autant plus que le rendement est élevé.

Tableau 14 : Influence du réglage de la faucheuse (largeur d'andain) sur la densité de l'andain et conséquences pour la dessiccation

action des volets de serrage (position)	largeur de l'andain (m)	rendement fourrager en sec (kg MS ha ⁻¹)	rendement équivalent en andains (kg MS ha ⁻¹)	intensité moyenne de dessiccation (% MS h ⁻¹)	comparaison des intensités moyennes (indice)
<i>Lolium perenne</i> (RGA) récolté à la Plaine des Cafres en octobre 1992					
serré	0.70	6280	21510	0.09	100
ouvert	1.20	6690	13380	0.15	167
<i>Dactylis glomerata</i> récolté à la Plaine des Palmistes en novembre 1992					
demi-serré	0.90	4130	11010	1.14	100
ouvert	1.20	4000	7990	1.24	109

Hauteur de coupe

Sous des conditions de vent moyennement favorables (5 km h⁻¹) et pour des REA comparables, la hauteur de fauche a une influence sur la dessiccation du dactyle (tableau 15). Un gain de 25 % dans l'intensité moyenne de dessiccation a été mesuré pour une faible différence de hauteur de fauche : les chaumes permettent une circulation d'air en isolant le fourrage du sol. Avec un rendement fourrager plus faible, l'augmentation d'intensité de dessiccation est moindre malgré la grande différence de hauteur de fauche constatée. En outre, un accroissement excessif de la hauteur de fauche se fait au détriment du rendement à la récolte. La fauche "haute" ne sera donc pratiquée avec intérêt que dans les cas de rendements fourragers élevés.

Tableau 15 : Influence de la hauteur de coupe sur l'efficacité de la dessiccation pour *Dactylis glomerata* récolté à la Plaine des Palmistes en novembre 1992

hauteur de coupe (mm)	rendement fourrager en sec (kg MS ha ⁻¹)	rendement équivalent en andains (kg MS ha ⁻¹)	intensité moyenne de dessiccation (% MS h ⁻¹)	comparaison des intensités moyennes (indice)
75	4750	11090	0.98	100
100	4700	11360	1.23	126
50	3040	7440	1.22	100
130	2950	7850	1.34	110

Conditionnement

Avec un rendement fourrager élevé, pour le RGA, le conditionnement (tableau 16) ne paraît pas agir en faveur de la dessiccation, il semble même que la reprise d'humidité de l'andain lors du brouillard survenu en début d'après-midi soit plus importante sur le fourrage conditionné. Par contre, l'action du conditionneur est très positive dans le cas du dactyle feuillu moyennement dense, puisqu'il permet un accroissement de 16 % de l'intensité de dessiccation.

Tableau 16 : Influence de l'action de conditionnement sur la dessiccation

action du conditionneur (position)	largeur de l'andain (m)	rendement fourrager en sec (kg MS ha ⁻¹)	rendement équivalent en andains (kg MS ha ⁻¹)	intensité moyenne de dessiccation (% MS h ⁻¹)	comparaison des intensités moyennes (indice)
<i>Lolium perenne</i> (RGA) récolté à la Plaine des Cafres en octobre 1992					
minimum	1.20	7450	14890	0.16	100
maximum	1.20	6690	13380	0.15	94
<i>Dactylis glomerata</i> récolté à la Plaine des Palmistes en novembre 1992					
minimum	0.90	4530	12090	1.14	100
maximum	0.90	4270	11390	1.32	116

Fanage

Un suivi de dessiccation par prélèvements avec la pince à andain (protocole I.T.C.F., Cabon, 1984) a été réalisé à la Plaine des Cafres en juin 1991 (tableau 17). La largeur de fauche était de 1.90 m, celle d'andainage de 0.90 m et le fanage ne couvrait pas totalement la surface fauchée. Pour le dactyle, la fauche ayant eu lieu en début d'après-midi, il semble que le fanage ait eu un effet positif sur le séchage au cours du premier jour : intensité de dessiccation de 1.45 et 0.08 % MS h⁻¹ avec un fanage aussitôt après la fauche et sans fanage, respectivement. Une pluie de 10 mm est survenue en fin de journée, le fourrage a retrouvé le lendemain une teneur en MS plus faible qu'à la fauche avec une absorption d'eau plus importante pour le fourrage fané. Au cours de la seconde journée moyennement ensoleillée avec du vent l'après-midi, le séchage s'est avéré plus efficace en andains peu denses qu'avec les quatre fanages successifs. Globalement, pour des REA similaires, la conduite de dessiccation en andain a été plus efficace. Par contre, en ce qui concerne le RGH avec un fort rendement fourrager, le fanage s'est avéré plus efficace qu'un simple retournement d'andain, puisqu'il a permis de gagner 5 points de MS supplémentaires grâce à la réduction du REA.

Tableau 17 : Influence du fanage en relation avec le rendement équivalent en andains pour *Dactylis glomerata* et *Lolium hybridum* (RGH) récoltés à la Plaine des Cafres en juin 1991

espèce fourragère	nombre de fanages	largeur de l'andain (m)	rendement fourrager estimé (kg MS ha ⁻¹)	rendement équivalent en andains (kg MS ha ⁻¹)	intensité moyenne de dessiccation (% MS h ⁻¹)	comparaison des intensités moyennes (indice)
dactyle	0	0.90	2500	5280	0.36	100
dactyle	5	1.70	5000	5590	0.22	61
RGH	0	0.90	6000	12670	0.16	100
RGH	5	1.70	6000	6710	0.45	281

Regroupement d'andains

A cause de rendements fourragers très élevés, la dessiccation a été très faible (tableau 18) malgré les 24 heures de séchage et des conditions climatiques favorables (insolation et vent toute la journée) : gain de 4 points de MS seulement. Le RGA est difficile à sécher (Jones, 1989). Dans ces conditions, les REA, bien que différents, ne semblent pas avoir influé sur la dessiccation. La différence entre les deux traitements est peu démonstrative.

Tableau 18 : Influence du regroupement d'andains sur la dessiccation de *Lolium perenne* (RGA) récolté à la Plaine des Cafres en octobre 1992

forme de l'andain	largeur de l'andain (m)	rendement fourrager en sec (kg MS ha ⁻¹)	rendement équivalent en andains (kg MS ha ⁻¹)	intensité moyenne de dessiccation (% MS h ⁻¹)	comparaison des intensités moyennes (indice)
simple et large	1.20	6690	13380	0.15	100
double et côte à côte	2 x 0.70	5410	18550	0.18	120

1.4.1.3. Conclusion sur la dessiccation des fourrages

Avec une durée d'insolation longue, un fort rayonnement solaire et des vitesses de vent élevées, la Plaine des Cafres (1550 m) présente les meilleures conditions pour le séchage du fourrage. Les risques pluviométriques sont assez limités, sauf pour le mois de février. Cependant, le déficit de saturation de l'air y est faible, d'où une durée de séchage qui doit être prolongée. Dans cette région, le fanage, aussitôt après la fauche, peut s'avérer intéressant pour profiter de l'insolation : séchage intense sur les premiers centimètres (Jones *et al.*, 1980). Cette opération serait utile vu les rendements fourragers trop élevés. La période de septembre à janvier semble la plus intéressante pour la récolte ; lorsque la pluie n'est pas limitante, elle permet une récolte de fourrage jeune, de qualité, présentant une bonne aptitude à l'ensilage, avec des rendements modérés autorisant une dessiccation rapide. Le mois de février est à éviter. Les stocks constitués de mars à mai seront souvent de moindre qualité (fourrage plus âgé et difficile à sécher), mais peuvent cependant constituer une réserve hivernale utile.

La Plaine des Palmistes (1025 m) présente des conditions de dessiccation plus difficiles eu égard à la fréquence des pluies. De janvier à mars, une récolte visant une dessiccation modérée serait préférable : ressuyage et coupe fine avec adjonction d'acide formique, l'ensilage en balles enrubannées est plus aléatoire. Tout le reste de l'année est par contre favorable à cette dernière technique. La période d'août à décembre est la plus propice : les températures élevées augmentent le déficit de saturation. L'insolation matinale doit être optimisée en fanant le fourrage tôt, le regroupement en andain aéré pour l'après-midi permet de continuer la dessiccation grâce à l'action de la température et du vent.

La région des Hauts de l'Ouest (1105 m) est la plus défavorisée : déficit de saturation faible (températures assez faibles et humidités élevées), très faible insolation, vents inexistant. Par contre, les risques pluviométriques, excepté en février, sont limités, la dessiccation devra donc être prolongée. La période la plus favorable se situe de mars à juin. La dessiccation est difficile à optimiser dans de telles conditions climatiques. Une fauche l'après-midi paraît la méthode la plus intéressante, car elle permet de couper un fourrage plus riche en MS et en glucides solubles (Waite *et al.*, 1953, in : McDonald *et al.*, 1991) et elle autorise surtout un séchage dès le lendemain matin en profitant des rares heures d'insolation. Le fanage est peu efficace, par contre un retournement fréquent des andains (plusieurs fois en cours de journée) renouvelle l'air humide emprisonné et maintient l'andain suffisamment aéré. Le rendement fourrager doit être modéré pour ne pas surcharger les andains.

Les observations des chantiers ont confirmé globalement l'étude des caractéristiques météorologiques. Les Hauts de l'Ouest présentent des conditions difficiles du point de vue de l'évaporation de l'eau du fourrage : il faut viser deux à trois jours de séchage au minimum pour atteindre une teneur en MS compatible avec l'ensilage en balles enrubannées. Dans la région des Plaines, les conditions climatiques permettent une dessiccation plus rapide, notamment le matin. Les résultats contrastés de la Plaine des Cafres, montrent cependant, qu'il est nécessaire de maîtriser le rendement fourrager et de récolter à un stade feuillu.

Il est, en outre, possible d'agir sur certains facteurs pour améliorer la dessiccation. La maîtrise du rendement fourrager est le principal facteur influençant les performances de séchage. Avec un rendement non maîtrisé ($> 4 \text{ t MS ha}^{-1}$), notamment en saison cyclonique lorsque les mauvaises conditions météorologiques retardent la récolte, il est nécessaire de couper à une hauteur importante (100 mm) qui permet de ventiler efficacement l'andain. Dans ces conditions, un fanage durant la matinée puis un séchage en andains larges l'après-midi doivent permettre d'atteindre 25, voire 35 % de MS. Avec un rendement normal (3 à 4 t MS ha^{-1}), une hauteur de coupe de 75 mm, le réglage de la faucheuse pour faire des andains aérés et larges (1.20 m) et le retournement des andains durant la matinée doivent permettre une dessiccation satisfaisante. Avec des rendements plus faibles ($< 3 \text{ t MS ha}^{-1}$), une hauteur de coupe de 50 mm maximise le rendement tout en assurant une dessiccation suffisante.

I.5. Conclusion sur l'aptitude des fourrages pour l'ensilage en balles enrubannées

Pour conserver les fourrages produits dans les Hauts de l'île sous forme de balles enrubannées, il faut lever deux handicaps principaux : la mauvaise aptitude des fourrages à l'ensilage et les difficultés de séchage liées aux conditions climatiques. Le premier handicap est facilement réglé par l'adjonction de mélasse qui permet de compenser la pauvreté en glucides solubles du fourrage, à des degrés plus ou moins importants selon l'espèce. Cet apport est d'autant plus efficace que ces fourrages opposent, pour la plupart, une faible résistance à l'acidification. Des abaques (Paillat, 1994) permettent d'adapter les doses à épandre selon l'espèce fourragère, la saison, la teneur en MS et le rendement.

Le second handicap est plus difficile à lever car il dépend largement des conditions climatiques. Il faut autant que possible choisir des périodes d'ensilage en tenant compte des caractéristiques climatiques de chaque région. Il est ensuite nécessaire de maîtriser le rendement fourrager (pas trop dense) et le stade (jeune). Enfin, les interventions mécanisées doivent être raisonnées selon la région, l'espèce fourragère et le rendement fourrager : hauteur de fauche, densité des andains, fanage et retournement des andains.

Dans les Hauts de l'Ouest, la pousse de l'herbe étant tardive (sécheresses prolongées et ensoleillement printanier faible), la première récolte a lieu en janvier : il faut alors viser une coupe au stade jeune avec un faible rendement fourrager, de manière à stocker un fourrage de bonne qualité. Les coupes suivantes (février et mars) sont aléatoires à cause de la difficulté de maîtrise du stade, du rendement et des conditions de séchage. Le fourrage récolté, de moins bonne qualité, peut cependant constituer un stock appréciable. Les coupes d'automne (avril et mai) sont de qualité correcte à un stade jeune. Vu les faibles déficits de saturation, la dessiccation doit être conduite en andains sur plusieurs jours. La fauche doit être suffisamment haute et un retournement d'andain doit avoir lieu une à deux fois chaque matin sur sol ressuyé.

Dans la région des Plaines, le démarrage précoce de la végétation au printemps permet de réaliser une ou plusieurs coupes au printemps si la pluie n'est pas un facteur limitant. Ces premières coupes sont de très bonne qualité (riches en feuilles). Les coupes de saison cyclonique sont plus aléatoires. A la Plaine des Cafres, les coupes de mars-avril sont correctes, le mois de mai procurant bien souvent peu de fourrage pour l'ensilage. La période d'ensilage de la Plaine des Palmistes est prolongée jusqu'en juillet avec des récoltes de bonne qualité. Pour la Plaine des Cafres, un fanage est très utile le matin, voire l'après-midi, particulièrement pour les forts rendements. A la Plaine des Palmistes, le matin assure le maximum de séchage grâce au fanage, le séchage se poursuit ensuite en andains larges et aérés durant l'après-midi.

Les meilleures conditions de séchage semblent en liaison avec une forte proportion d'espèces tempérées. L'installation de graminées tempérées est préférable (meilleure aptitude à la dessiccation et teneur en glucides solubles plus élevée). Comme les parcelles de la Plaine des Palmistes l'ont montré, la fétuque devrait être choisie plus souvent. Le brome paraît aussi intéressant, mais peu de parcelles ont été suivies. Pour les ray-grass, difficiles à sécher, il faut éviter les forts rendements et récolter à des stades où le fourrage est encore riche en feuilles.

2^{ème} Partie :

ETANCHEITE DE L'ENRUBANNAGE ET RESISTANCE DES FILMS ETIRABLES EN CONDITIONS TROPICALES

II.1. Introduction

La 1^{ère} partie concernait l'étude des facteurs liés au fourrage : aptitude à l'ensilage et conditions de dessiccation. Cette seconde partie traite, quant à elle, de la technique d'enrubannage qui consiste à mettre le fourrage à l'abri de l'air, et plus spécialement de l'aptitude des films étirables à constituer un emballage étanche sous conditions tropicales et conditions d'altitude.

En effet, l'étanchéité à l'air conditionne la réussite et la stabilité de l'ensilage sur une longue période. Dans les balles enrubannées, le film étirable est posé en plusieurs couches (Gaillard *et al.*, 1989) entre lesquelles l'air extérieur peut éventuellement pénétrer, le film lui-même peut en outre devenir poreux. Aussi, depuis quelques années, le CEMAGREF, échelon de Montoldre, étudie l'étanchéité des balles enrubannées. Il a mis au point plusieurs méthodes de qualification des films étirables, qui contribuent actuellement à la certification de ces films sous la Marque de Qualité définie par les normes N.F. T-54190 et N.F. T-54191 (Lambert, 1993ab ; LeDuc, 1993 ; Gaillard, 1994). A La Réunion, compte tenu des conditions climatiques très différentes de celles rencontrées en France métropolitaine, il était intéressant de connaître le comportement des films étirables, notamment du point de vue de l'étanchéité à l'air et de la résistance aux rayonnements et températures élevés.

Cette seconde partie est donc divisée en trois chapitres. Le premier chapitre présente les matériels et méthodes utilisées pour quantifier l'étanchéité à l'air et qualifier les films étirables. Des compléments décrivant les dispositifs mis en oeuvre, ainsi qu'une étude des paramètres atmosphériques intervenant sur les mesures à partir de la modélisation des échanges gazeux, sont proposés en annexe C.

Le second chapitre s'attache à présenter les conditions d'étanchéité des emballages, avec l'étude de plusieurs facteurs déterminants. A partir des essais conduits, plusieurs améliorations de la méthodologie de certification des films étirables sont proposées.

Le troisième chapitre traite de la résistance des films en conditions d'exposition tropicale sur le site de S^t Pierre (170 m) et en conditions tropicales d'altitude sur le site de la Plaine des Cafres (1500 m). Des hypothèses concernant l'influence de la température et du rayonnement sur la longévité des films sont proposées.

II.2. Matériels et méthodes

II.2.1. Mesures d'étanchéité

Les dispositifs expérimentaux permettant de tester les films étirables ont été mis au point avec le CEMAGREF, échelon de Montoldre (Gaillard *et al.*, 1989). L'étanchéité des emballages est évaluée en injectant de l'air dans la balle et en mesurant des différences de pressions (ΔP) à l'équilibre pour des débits d'air connus (Q_v). Les paliers de différences de pressions obtenus caractérisent la courbe d'étanchéité : $\Delta P = f(Q_v)$.

II.2.1.1. Capteurs utilisés pour la mesure d'étanchéité

Débitmètres - régulateurs massiques

Le fonctionnement des deux débitmètres Brooks Instrument (Rosemount) modèle 5850E, gammes 0 - 3 et 0 - 12 l min⁻¹, est basé sur la mesure (précision de $\pm 5\%$) des transferts caloriques provoqués par le gaz (annexe C - p 51). Le constructeur donne des facteurs de correction pour chaque gaz. Si les conditions d'utilisation sont différentes des conditions de référence (air sec à 25 °C et 1 atm), la variation de chaleur spécifique du gaz occasionne une erreur. Une électrovanne assure la régulation. Une alimentation Brooks à deux voies, modèle 5876, pilote les débitmètres. Deux potentiomètres contrôlent chacun des débitmètres par réglage du point de consigne des électrovannes. L'affichage est donné en % de la pleine échelle des débitmètres. Deux sorties analogiques (0 - 5 V) sont reliées à une centrale d'acquisition.

Le contrôle sur fût étanche a fait apparaître une différence entre les mesures de La Réunion et celles de Montoldre. Après vérification du capteur de pression sur colonne d'eau, le débitmètre 0 - 12 l min⁻¹ a été contrôlé sur un volumètre Brooks. La régression sur ces mesures (annexe C - p 52), détermine un coefficient de correction du débitmètre 0 - 12 l min⁻¹ : $k_{12} = 1.092$. La comparaison des deux débitmètres sur fût étanche, à débits affichés identiques, donne l'équation suivante : $\Delta P_{12} = 1.145 \times \Delta P_3$ [1]. Calculé avec l'équation [1] et l'équation thermodynamique $\Delta P = K Q_v^2$ [2], le coefficient de conversion entre les débitmètres k_{12} / k_3 , égal à 1.077, amène au coefficient de correction du débitmètre 0 - 3 l min⁻¹ : $k_3 = 1.014$.

Capteurs et transmetteurs de pressions

Deux capteurs de pressions différentielles et relatives Sedeme, série hautes performances (FAS 75 et FAS 63), gammes : 0 - 2 et 0 - 50 mbar (précision = 0.2 % EM⁶²), étalonnés en usine, sont vérifiés régulièrement l'un par rapport à l'autre sur fût étanche en mesures simultanées.

⁶² Etendue de Mesure

La cellule de mesure est divisée en deux chambres séparées par une membrane munie d'une cible non ferromagnétique (annexe C - p 52). La membrane se déplace très légèrement (moins de 0.1 mm) en fonction de la différence de pression existant entre les deux chambres. Un capteur à courants de Foucault, constitué de deux bobines, mesure ce déplacement sans aucun contact mécanique. Une électronique interne au capteur délivre un signal analogique de sortie (0 - 5 V), envoyé à la centrale d'acquisition.

Thermocouples et hygromètres

Plusieurs thermocouples en chromel - alumel sont utilisés pour la mesure des températures (précision de 0.1 °C) : sondes "aiguilles" de différentes longueurs avec étoupes d'étanchéité pour mesure à l'intérieur des balles, sondes "pastilles" pour mesure des températures de surface. Ils sont connectés directement sur la centrale d'acquisition (entrée analogique différentielle), la température de référence étant celle du boîtier de la centrale.

L'humidité de l'air (Hr) est mesurée par des transmetteurs capacitifs délivrant un signal 4 - 20 mA pour une gamme de mesures de 0 à 100 % (précision de ± 3 %). Ils sont alimentés à travers la boucle 4 - 20 mA comprenant une résistance. Le signal est envoyé à la centrale d'acquisition. L'étalonnage s'effectue par mise en équilibre des sondes dans des solutions à saturation : CaCl_2 à 25 °C pour Hr = 35 % et KCl à 20 °C pour Hr = 86 %.

II.2.1.2. Centrale d'acquisition, transfert et traitement des données

Une centrale micrologger 21X (Campbell Scientific) permet la collecte de données avec un pas de temps programmable (de 0.1 à 6553 s). Tous les capteurs y sont reliés. Environ 20000 données sont stockables dans sa mémoire. Les connexions, prévues pour 8 entrées analogiques différentielles (thermocouples) ou 16 entrées analogiques simples (capteurs de pression, de débit, sondes de pH), peuvent être étendues par un multiplexeur. La consommation de courant étant réduite, le fonctionnement est assuré en 12 V par des piles LR20. Cependant l'alimentation des capteurs est réalisée avec un transformateur sur le secteur 220 V. Un clavier permet la programmation directe et la lecture des valeurs mesurées sur un afficheur.

Pour l'application à la mesure d'étanchéité, un boîtier intermédiaire de liaison comprend : la connexion des capteurs, une électronique d'alimentation et de sécurité lors des coupures du secteur (batteries), une électronique de régulation (résistances, condensateurs) pour limiter les interférences entre les signaux, deux électrovannes pilotées par la centrale pour la mesure des différences de pression sur deux balles à la fois, et une fiche DB24 reliée par câble à la centrale. Les capteurs de pression, les capteurs de débit et leur module d'alimentation, le boîtier de liaison et la centrale 21X sont positionnés dans un coffret en bois (figure 9). La chaîne de mesures est ainsi protégée et facilement transportable.

Une connexion sur port série avec interface SC32A (Campbell Scientific) permet de relier la centrale à un micro-ordinateur de type PC. Deux logiciels spécifiques (Campbell Scientific) sont utilisés : l'un pour créer et modifier les fichiers de programmation de la centrale et l'autre pour converser avec la centrale (transfert de programme, récupération de données). Les données sont importées puis converties sur tableur pour calculs et graphiques.

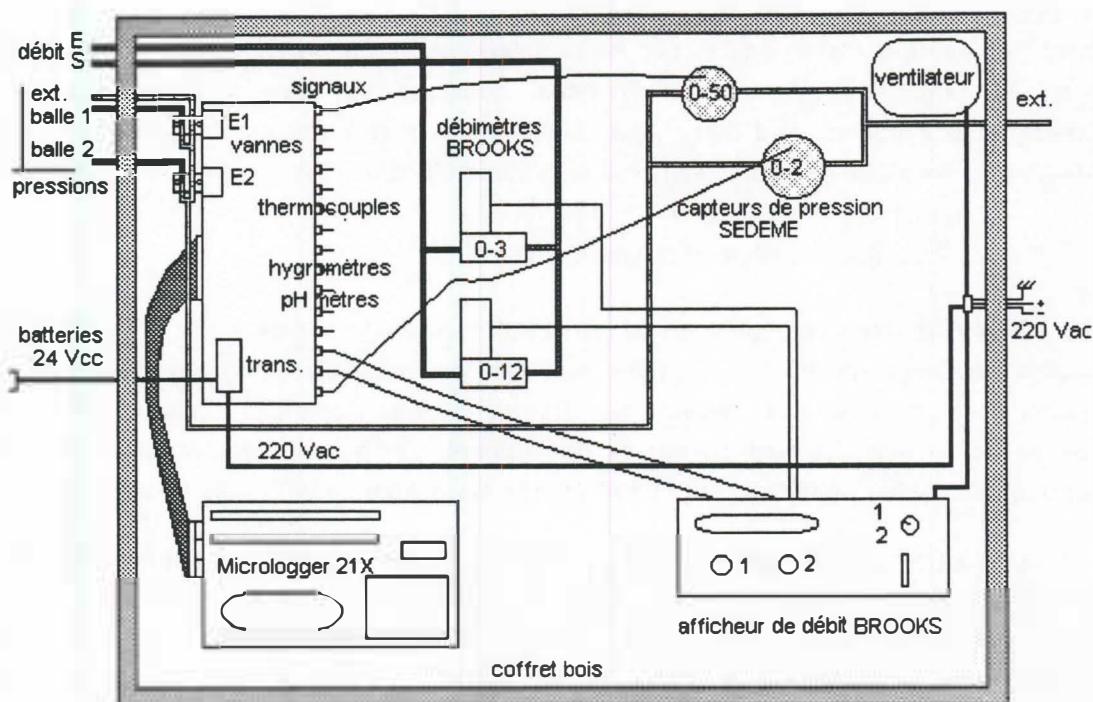


Figure 9 : Chaîne de mesures comprenant les capteurs (pression, débit), l'afficheur de débit, le boîtier de liaison et la centrale d'acquisition Campbell

II.2.2. Fût étanche

II.2.2.1. Principe et construction

Ce matériel (photo 5 - p 84) sert à la compréhension des phénomènes d'échanges gazeux intervenant dans les balles, à la modélisation des paramètres physiques liés à ces échanges et au contrôle périodique du bon fonctionnement de la chaîne de mesures. Le défaut d'étanchéité des emballages sur balles enrubannées peut être approché par un débit de fuite unique caractérisée par une buse (annexe C - fig. C5 - p 53). Une entrée d'air permet la mise sous pression du fût à des débits contrôlés. Un dessiccateur, composé d'une cuve contenant du CaCl_2 et d'une cuve contenant un gel de silice est placé en amont des débitmètres pour obtenir un air sec ($\text{Hr} = 10 \%$). L'alimentation en air provient d'un compresseur et celle en CO_2 d'une bouteille. La mesure de différence de pression se fait sur une seconde prise.

II.2.2.2. Méthode expérimentale

Les conditions atmosphériques sont données par les capteurs (températures intérieure et extérieure, humidités intérieure et extérieure) et par Météo France pour la pression au niveau de la mer (station de Gillot), l'altitude du lieu d'expérimentation étant de 100 m.

La différence de pression (ΔP), composée de 10 répétitions (scrutation toutes les 5 s), est notée après l'obtention d'un palier, repéré sur table traçante connectée à la centrale. Plusieurs buses de différents diamètres ($d = 1.5 - 2 - 3 \text{ mm}$) sont utilisées, pour différents débits ($Q_v = 0.3 - 0.6 - 0.9 - 1.2 - 1.5 - 2 - 2.5 - 3 - 4 - 6 - 9 - 12 \text{ l min}^{-1}$). Les courbes obtenues permettent de tracer un abaque (annexe C - fig. C11 - p 57) : $\Delta P = f(Q_v, d)$.

II.2.3. Balles témoins

II.2.3.1. Principe et construction

Les balles témoins (cylindriques) sont construites en tubes métalliques et représentent les dimensions théoriques d'une balle de fourrage ($\Phi 1.20 \text{ m} \times 1.20 \text{ m}$) (annexe C - fig. C6 - p 53). C'est la référence utilisée pour le test d'étanchéité inscrit dans la qualification des films sous les normes N.F. T-54190 et N.F. T-54191 (LeDuc, 1993 ; Lambert, 1993ab ; Gaillard, 1994). L'emballage des balles témoins est toujours effectué sur la même enrubanneuse (Kverneland Silawrap 7510 étudiée par Gaillard, 1988) et dans des conditions atmosphériques identiques (température, humidité, altitude). Le film, étiré à 60 %, doit être centré et appliqué sur la balle avec un recouvrement de 50 % (Cedra *et al.*, 1989).

II.2.3.2. Identification des films testés

Après contrôle par le L.N.E.⁶³ et test d'étanchéité au CEMAGREF, plusieurs bobines de film ont été expédiées à La Réunion pour réaliser les suivis sous exposition et les tests d'étanchéité. Certains films proviennent directement des lots utilisés chez les agriculteurs (Union des A.F.P.). Les films sont codifiés afin de respecter l'anonymat des constructeurs.

Tableau 19 : Identification et principales caractéristiques des films étirables

code	année	couleur	structure	largeur (mm)	fabricant	provenance
A	1989	blanc	tri-couche	500	S	Union des A.F.P.
B*	1990	noir	tri-couche	500	S	Union des A.F.P.
C	1991	noir	tri-couche	750	S	Union des A.F.P.
D	1991	noir	tri-couche	500	B	CEMAGREF
E	1991	blanc	mono-couche	500	T	CEMAGREF
F	1991	vert	mono-couche	500	V	CEMAGREF
G	1991	vert	mono-couche	750	V	CEMAGREF
H*	1991	noir	tri-couche	500	S	CEMAGREF

B et H sont les mêmes films (fabricant, largeur, couleur) achetés à des dates différentes

⁶³ Laboratoire National d'Essais

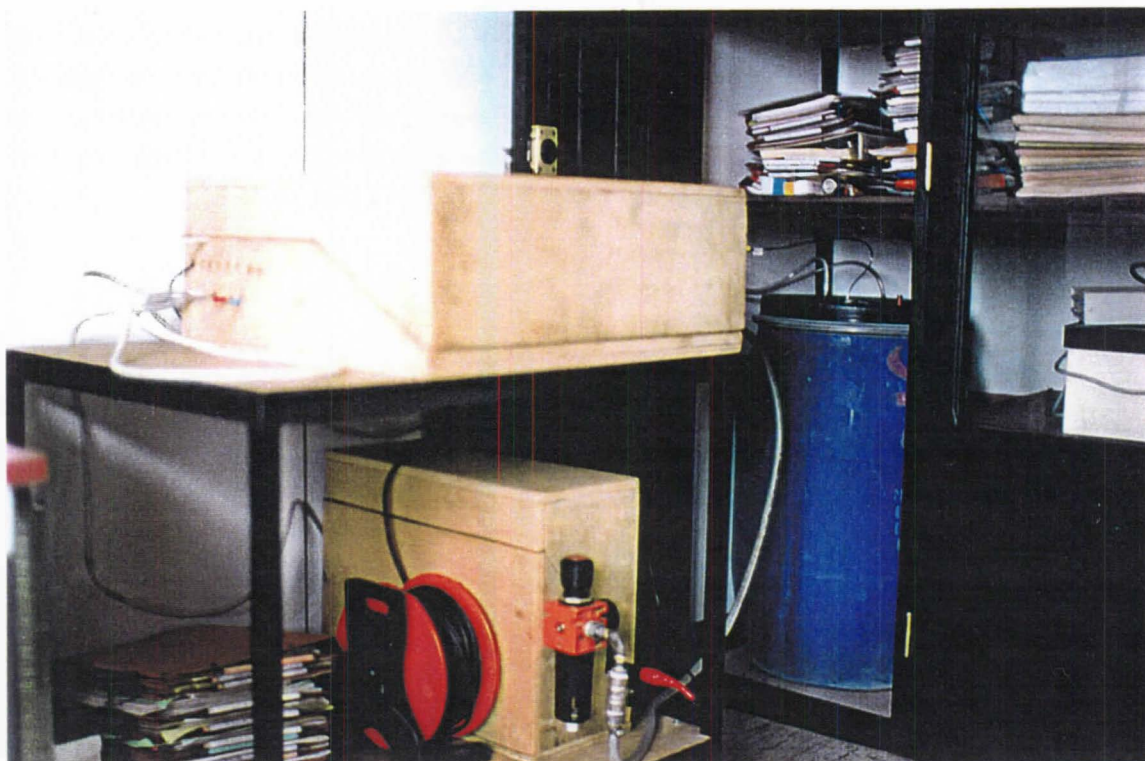


Photo 5 : Dessiccateur, chaîne de mesure et fût étanche



Photo 6 : Cadres inclinés et balles témoins pour l'exposition des films étirables

II.2.3.3. Méthodes expérimentales

Balles témoins simplifiées (annexe C - p 53)

Pour comparer la résistance des films sous conditions atmosphériques extérieures, les films sont étirés en 4 couches sur ces balles qui sont ensuite posées sur une de leurs faces planes et disposées perpendiculairement à l'insolation maximale du lieu (Nord géographique à La Réunion) sur le site d'exposition de S^t Pierre (170 m) (photo 6 - p 84).

L'évolution des différences de pression au cours du temps, pour des débits déterminés, permet de quantifier la perte d'étanchéité. Deux orifices sur la face plane supérieure permettent de connecter la chaîne de mesures (figure 9 - p 82). Afin de ne pas endommager de façon irréversible l'emballage, le niveau du débit supérieur est déterminé pour chaque film en fonction des résultats du test sur la balle d'expérimentation. La notation qualitative du comportement de l'emballage est aussi très importante : déchirement, usure, perte du collant, trous, impacts du rayonnement. Les données météorologiques du site sont fournies par le C.I.R.A.D..

Balle d'expérimentation

Cette balle a les mêmes dimensions et structures que les balles simplifiées. Cependant, ses faces planes sont déformables de manière à obtenir deux faces bombées. La mesure de l'étanchéité se fait sur l'enrubanneuse en laboratoire, balle posée sur face cylindrique. Un orifice sur chaque face plane permet le branchement des capteurs (pression, débit). Les conditions de laboratoire (T, Hr, pression au niveau de la mer) sont enregistrées.

L'étanchéité est déterminée par la différence de pression enregistrée à différents débits (0.3 - 0.6 - 0.9 - 1.2 - 1.5 - 2 - 2.5 - 3 - 4 - 6 - 9 - 12 - 15 l min⁻¹) jusqu'à la rupture de l'emballage (passage d'air entre les couches de film) ou l'établissement d'un palier de pression constante. Le contrôle des paliers se fait grâce à la table traçante. Plusieurs études ont été menées sur cette balle : reproductibilité des tests, comparaison des films étirables, étanchéité des faces planes, influence du nombre de couches, effet collant.

II.2.4. Exposition des films étirables

II.2.4.1. Exposition sur balles témoins

Une comparaison qualitative de la résistance aux conditions extérieures (photo 6 - p 84) de 6 films avec 2 répétitions sur des balles témoins a été réalisée à S^t Pierre (170 m) sur la base du protocole CEMAGREF - L.N.E. (Gaillard *et al.*, 1993 ; Lambert, 1993ab).

II.2.4.2. Exposition sur balles d'ensilage

Des observations qualitatives concernant un film blanc (A) et un film noir (B), provenant du même fabricant, ont été réalisées durant la campagne 1990 - 1991 dans plusieurs régions : S^t Pierre (300 m), Plaine des Palmistes (1000 m), Hauts de l'Ouest (1400 et 1000 m) et Plaine des Cafres (1500 m). Des observations de même nature ont également été effectuées en 1992 sur le site de la Plaine des Palmistes (1000 m) concernant les films C, D, E, F, G, H.

II.2.4.3. Exposition sur cadres

Conformément à la norme N.F. T-51165 (AFNOR⁶⁴, 1980), deux expérimentations sur cadres en bois (annexe C - fig. C8 - p 54) (photo 6 - p 84) ont été conduites sur deux sites : S^t Pierre (170 m d'altitude) et Plaine des Cafres (1500 m d'altitude). A La Réunion, les cadres sont inclinés de 21° (latitude) et orientés vers le Nord géographique.

Les observations recueillies sont mises en relation avec les données météorologiques quotidiennes obtenues au service bioclimatologie du C.I.R.A.D. pour S^t Pierre et de Météo France pour la Plaine des Cafres : hauteur de pluies, vent maximal instantané, températures minimale et maximale, insolation, rayonnement global, humidités minimale et maximale.

La première expérimentation a démarré en juillet 1992 et s'est achevée en septembre 1993. Six films étirables (C, D, E, F, G, H) ont été comparés avec trois taux d'étirage (10, 60 et 120 %). La seconde expérimentation a démarré en septembre 1993. Seulement trois films ont été retenus suite à la première expérimentation, avec un seul taux d'étirage (60 %), avec 2 modalités : 1 couche de film ou 2 couches de film, et 3 répétitions. Les résultats de cette seconde expérimentation ne seront connus qu'à la fin de l'année 1995, car la plupart des films sont encore en place actuellement. Un dispositif permet d'étirer les films en plusieurs couches (annexe C - fig. C7 - p 54).

II.2.5. Traitement des données

Les données sont traitées comme nous l'avons indiqué au paragraphe I.2.4. p 53 (Philippeau, 1986 ; Dervin, 1988 ; Tomassone, 1988 ; Gouet *et al.*, 1989 ; Tomassone *et al.*, 1989, 1993 ; Marija J. Norusis, 1990 ; Tranchefort *et al.*, 1991 ; Frater *et al.*, 1992 ; Kecler *et al.*, 1993).

⁶⁴ Association Française de Normalisation

II.3. Incidences des paramètres atmosphériques sur les mesures

II.3.1. Introduction

Effectués avec le même matériel, les tests d'étanchéité sur balle d'expérimentation et sur fût étanche ont fait apparaître des différences dans les mesures entre la métropole (CEMAGREF Montoldre) et La Réunion. Dès lors, il paraissait intéressant d'étudier l'influence des conditions extérieures sur les mesures de débits et de différences de pression utilisées pour la qualification des films étirables.

II.3.2. Modélisation des échanges gazeux

L'étanchéité d'une balle est approchée par la différence de pression à l'équilibre pour un débit d'air injecté. Sous l'hypothèse d'écoulement isentropique, ce débit d'air injecté est considéré comme un débit de fuite (Singainy, 1992). La fuite d'une balle enrubannée étant très difficile à mesurer car les passages d'air s'opèrent entre les couches de film, en différents points de la balle (Gaillard *et al.*, 1989), la simulation du débit de fuite par des buses calibrées permet de cerner les paramètres intervenant dans la mesure d'étanchéité. La modélisation des écoulements à partir d'un modèle thermodynamique théorique n'a pas donné satisfaction (modèle ne correspondant pas aux données observées). Une seconde approche par la résolution d'une équation dimensionnelle, prenant en compte l'expérience, a donc été privilégiée. Les points principaux de cette étude sont résumés en annexe C pp 55-58 (Singainy, 1992).

II.3.3. Simulations des variations de conditions d'essais

Grâce aux formules obtenues par résolution de l'équation dimensionnelle (annexe C - p 56), l'influence des conditions atmosphériques et de leurs variations sur les mesures de différence de pression, effectuées lors des tests d'étanchéité, peut être approchée.

II.3.3.1. Influence des principaux paramètres atmosphériques

Les mesures réalisées sur fût étanche montrent que la différence de pression diminue de 1.05 % par 100 m d'altitude et augmente de 0.1 % par hPa de pression atmosphérique au niveau de la mer (P_0). Dans les mêmes conditions d'essai, la différence de pression diminue de 0.35 % par °C de température et de 0.05 % à 0.21 % par 10 % d'humidité relative selon la température (tableau 20).

Tableau 20 : Différences de pression simulées (ΔP en mbar) et variations unitaires, selon la température et l'humidité relative de l'air extérieur

humidité relative (%)	température de l'air extérieur (°C)						variation par °C
	10	15	20	25	30	35	
30	0.528	0.519	0.510	0.501	0.492	0.484	-0.34%
50	0.528	0.518	0.509	0.500	0.491	0.482	-0.35%
70	0.527	0.518	0.508	0.499	0.489	0.480	-0.36%
90	0.527	0.517	0.507	0.497	0.488	0.478	-0.37%
variation par 10 %	-0.05%	-0.06%	-0.09%	-0.12%	-0.16%	-0.21%	

buse de 2 mm ; débit d'air sec affiché = 2.5 l min⁻¹ (débitmètre 0 - 12 l min⁻¹) ; température = 20°C ; humidité relative = 70%
pression atmosphérique au niveau de la mer = 1017 hPa ; altitude = 100 m

Calculées en fixant les conditions atmosphériques moyennes pour chaque site d'expérimentation (tableau 21), les variations de différences de pressions induites par les conditions atmosphériques sont peu importantes d'un site à l'autre, sauf lorsque la différence d'altitude est importante. La différence entre le site du CEMAGREF et celui du C.I.R.A.D. n'est que de 2 à 3 %. Par contre, la différence entre le site de S^t Pierre (170 m d'altitude) et celui de la Plaine des Cafres (1500 m) est supérieure à 10 %.

Tableau 21 : Comparaison des différences de pression (ΔP) simulées dans certaines conditions climatiques des différents sites d'expérimentation

caractéristiques	CEMAGREF	C.I.R.A.D.	C.I.R.A.D.	S.I.C.A. - Lait
	Montoldre	S ^t Denis	S ^t Pierre	Plaine des Cafres
Hr (%)	40	90	90	80
T (°C)	15	28	28	18
z (m)	300	100	170	1500
P0 (hPa)	1013	1015	1015	1015
ΔP (mbar)*	1.936	1.882	1.867	1.669

Hr = humidité relative de l'air ; T = température de l'air ; z = altitude ; P0 = pression atmosphérique au niveau de la mer
* simulation sur fût étanche avec la buse de 2 mm et un débit d'air sec affiché de 2.5 l min⁻¹ (débitmètre 0-12 l min⁻¹)

Connaissant les variations possibles, les mesures de différences de pression peuvent être corrigées à un niveau "standard" : pression atmosphérique de 1013 hPa, humidité relative de 50 % et température de 20 °C. Avec ces corrections, les mesures deviennent comparables entre sites et dans le temps. Pour les tests d'étanchéité sur un site donné, la correction est peu utile si les mesures sont effectuées en ambiance contrôlée (température, humidité). En outre, lors des suivis de fermentations (3^{ème} partie), la correction n'est pas nécessaire car les balles sont comparées en mêmes lieux et temps.

II.3.3.2. Influence de l'humidité et de la température de l'air injecté

Pour les tests d'étanchéité, la température et l'humidité de l'air injecté peuvent être différentes de l'air ambiant et variables. Les débitmètres massiques mesurant l'importance des échanges caloriques, le volume injecté dépend des caractéristiques d'humidité et de température du gaz. Un facteur de correction de la mesure de débit volumique, déterminé sur le diagramme de l'air humide Solyvent et basé sur la variation de chaleur spécifique du mélange air - eau selon la température et l'humidité, a été simulé avec le modèle (annexe C - p 58).

La simulation (tableau 22) montre que la température influe sur la mesure de différence de pression (-0.28 % par °C) à une humidité élevée (Hr = 90%). Par contre elle influe peu (-0.03 % par °C) à une humidité faible (Hr = 10%). Un essai sur le fût a permis de valider cette simulation. Ces résultats confirment l'utilité, pour les tests d'étanchéité, du dessiccateur (deux cuves en série avec CaCl₂ et SiO₂) qui fournit un air sec (Hr = 10 à 20 %).

Tableau 22 : Différences de pression simulées (ΔP en mbar) et variations unitaires, selon la température et l'humidité relative de l'air injecté

humidité relative (%)	température de l'air injecté (°C)						variation par °C
	10	15	20	25	30	35	
10	1.951	1.947	1.947	1.943	1.940	1.936	-0.03 %
50	1.933	1.926	1.915	1.901	1.880	1.858	-0.15 %
90	1.915	1.901	1.883	1.855	1.824	1.779	-0.28 %
variation par 10 %	-0.2 %	-0.3 %	-0.4 %	-0.6 %	-0.7 %	-1.0 %	

buse de 2 mm ; débit d'air affiché = 2.5 l min⁻¹ (débitmètre 0 - 12 l min⁻¹) ; température = 20°C ; humidité relative = 40%
pression atmosphérique au niveau de la mer = 1017 hPa ; altitude = 100 m

II.3.4. Conclusion

L'incidence des paramètres atmosphériques a pu être appréhendée grâce à cette étude thermodynamique et aux simulations qui en découlent. Les résultats acquis au cours de ces essais nous permettent d'apporter une réponse concernant la validité des tests et des mesures. Cependant, la modélisation et les simulations résultent d'essais menés sur un fût. La transposition des résultats directement aux balles enrubbannées n'est pas directe car le comportement du film étirable, appliqué en plusieurs couches collantes, est différent de celui du fût avec buse calibrée. Les phénomènes en jeu ont seulement été mieux cernés avec le modèle.

Les variations de conditions atmosphériques sont peu influentes sauf l'altitude. Si l'on accepte un seuil d'approximation de 5 %, et compte tenu des imprécisions sur les mesures et des erreurs liées aux capteurs, il est peu utile de corriger les différences de pression enregistrées. Néanmoins, dans le cas de la comparaison de l'étanchéité des différents films, et en l'absence d'un local d'expérimentation climatisé, la correction s'avère préférable. Elle l'est également pour comparer les résultats du CEMAGREF avec ceux de La Réunion.

II.4. Tests d'étanchéité sur films étirables

II.4.1. Introduction

Les tests d'étanchéité sur la balle d'expérimentation, retenus en France depuis début 1993 sous les normes N.F. T-54190 et N.F. T-54191, permettent de comparer les films étirables. En conditions tropicales, ces films ne sont pas soumis aux mêmes contraintes. Il paraissait donc important d'apporter une contribution à la caractérisation de films, choisis parmi les plus étanches et résistants de ceux testés par le CEMAGREF. Les résultats des tests d'étanchéité, et les observations sur la résistance des films en exposition (chapitre II.5.), permettent de choisir les films les mieux adaptés aux conditions tropicales d'altitude. En outre, ces tests nous ont permis de mettre au point les suivis de fermentations (3^{ème} partie).

II.4.2. Notion de seuil pour qualifier l'étanchéité

Le CEMAGREF a mis au point la méthode de réalisation des tests (Gaillard *et al.*, 1989) publiée par l'AFNOR en 1994 sous la référence N.F. T-54191. Plusieurs débits sont appliqués à la balle d'expérimentation et plusieurs paliers de différences de pression établis. La Marque de Qualité (N.F. T-54190) prend la moyenne de trois essais avec un seuil de qualification défini par $\Delta P \geq 0.4$ mbar pour $Q_v = 2.5$ l min⁻¹.

En réalité, la montée en pression doit être progressive. La courbe est quasi linéaire jusqu'à 3 l min⁻¹ environ ; au delà les mesures de ΔP sont aléatoires (décollement des couches de film). Le coefficient de régression linéaire de la fonction $\Delta P = f(Q_v)$ (pour $Q_v < 4$ l min⁻¹), que nous pouvons appeler C_e (Coefficient d'étanchéité), permet alors de caractériser l'étanchéité du film. Le seuil de qualification, correspondant à la norme N.F. T-54190, devient : $C_e \geq 0.16$ ($C_e = 0.4 / 2.5$ avec ΔP en mbar et Q_v en l min⁻¹). L'avantage de cette méthode est la prise en compte de plusieurs débits d'air, ce qui améliore la précision : 24 points déterminent la valeur d'étanchéité au lieu de 3 dans la méthode N.F. T-54190.

II.4.3. Reproductibilité des tests

La durée de chaque test étant d'environ 3 heures, il n'est pas possible de réaliser de nombreuses répétitions. Pour un des films, 10 tests ont cependant été effectués (tableau 23) pour cerner la distribution et le coefficient de variation. La représentation par histogramme des 10 tests du film C rend compte d'une distribution d'apparence normale selon les coefficients de K. Pearson (Tomassone, 1989) : symétrie = 0.015 (valeur idéale = 0), aplatissement = 2.2 (valeur idéale = 3). Il semble que trois mesures suffisent car le coefficient de variation varie peu lorsque le nombre de répétitions augmente. Cependant, lorsqu'une des mesures diffère beaucoup, d'autres tests sont nécessaires : la Marque de Qualité prévoit alors cinq tests.

Tableau 23 : Mesures d'étanchéité pour le film C (10 répétitions)

ΔP (mbar)	débit corrigé (l min ⁻¹) d'après la méthode décrite § II.2.1.								Ce (mbar min l ⁻¹)
	0.31	0.61	0.92	1.22	1.53	2.04	2.55	3.06	
moyenne	0.091	0.141	0.185	0.233	0.279	0.365	0.443	0.538	0.179
écart-type	0.023	0.028	0.041	0.047	0.056	0.062	0.075	0.086	0.029
C.V. (%)	25	20	22	20	20	17	17	16	16

C.V. = coefficient de variation ; Ce = coefficient d'étanchéité défini § II.4.2.

II.4.4. Comparaisons de l'étanchéité de différents films

L'aptitude à l'étanchéité d'un film peut être caractérisée par les coefficients Ce et C.V. (tableau 24) : certains films présentent des tests très reproductibles (C.V. < 10 %), alors que d'autres présentent des tests très différents d'un enrubannage à l'autre (C.V. > 30 %).

Tableau 24 : Valeurs du coefficient d'étanchéité (Ce) et du coefficient de variation (C.V.) pour différents films (protocole § II.2.3.), et comparaison à la norme N.F. T-54190 (Ce seuil = 0.16)

caractéristiques	A	B et H	C	D	D*	E	F	G
largeur du film (cm)	50	50	75	50	50	50	50	75
nombre de répétitions	3	6	10	6	3	6	6	3
Ce moyen**	0.39 ^d	0.29 ^{bc}	0.18 ^a	0.25 ^b	0.24 ^{ab}	0.32 ^c	0.25 ^b	0.27 ^{bc}
C.V. (%)	10	16	17	28	17	17	13	2
Ce moyen / Ce seuil (0.16)	2.43	1.79	1.12	1.56	1.50	1.97	1.55	1.68

* = résultats du CEMAGREF sur le film D ; ** analyse de variance : test de Fischer, p < 0.001
les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05

Le film A est particulièrement étanche (tableau 24) (annexe C - fig. C12 - p 59). Les films B, D, E, F, G et H le sont moyennement. Le film C paraît peu étanche bien que le Ce moyen soit légèrement au-dessus de la norme. Seuls, les films C et D ont présenté des tests inférieurs à la norme. Les tests sur films D sont identiques dans les deux sites. Dans le cas des films B, H et C provenant du même fabricant, la largeur du film semble être un facteur de diminution de l'étanchéité. Ce constat va à l'encontre des tests effectués par le CEMAGREF (Gaillard, 1993) sur un film de 1 m et un film de 50 cm issus de la même fabrication. En fait, il est difficile de vérifier la provenance des films testés à La Réunion, d'autant que ce fabricant propose, sous des références identiques, deux qualités de résistances aux U.V.⁶⁵. Des tests sont actuellement repris par le CEMAGREF en utilisant uniquement des bobines de 75 cm qui sont testées en pleine largeur puis réduites de 25 cm.

⁶⁵ rayonnement Ultra - Violet

II.4.5. Incidence de différents facteurs sur l'étanchéité

Actuellement, à La Réunion, l'utilisation de films de 750 mm est le cas le plus fréquent (seule la S.I.C.A. - Lait possède une machine pour films de 500 mm). Par conséquent, la plupart des essais ont été réalisés avec les films de 750 mm (C et G). Les films A et B ont été utilisés par les éleveurs en 1990 et 1991 (quelques tests d'étanchéité réalisés à cette période concernant le film A). Le film C a été utilisé par les éleveurs en 1992 et 1993. Depuis 1994, seul le film D est utilisé par l'Union des A.F.P. (750 mm) et par la S.I.C.A. - Lait (500 mm). Pour les essais présentés dans ce sous-chapitre, réalisés pendant la mise au point de la méthode, les débits d'air injectés étaient élevés et sans progression. Dans ces conditions, l'emballage atteignait rapidement la rupture. Le calcul du coefficient d'étanchéité n'a donc pas été possible, par manque de mesures dans la montée en pression de 0 à 3 l min⁻¹. Cependant, nous pouvons utiliser la pression différentielle mesurée à la rupture d'étanchéité (ΔPr).

II.4.5.1. Etanchéité des faces planes

La forme des faces planes, passage privilégié pour l'air (Gaillard *et al.*, 1989), conditionne les niveaux d'étanchéité obtenus car leur bombage permet une meilleure adhésion des couches de films entre elles. Un essai (tableau 25) (annexe C - fig. C13 - p 59) sur 2 films de 750 mm (C et G), avec enrubannage en 4 couches, a été conduit sur la balle d'expérimentation dont les flasques (faces planes) peuvent être écartées, au centre de la face, de 0 à 100 mm par rapport à son plan normal (bombage). On constate pour les deux films un doublement de la pression différentielle à la rupture avec le bombage des faces planes. Ce phénomène est perceptible même pour un faible bombage (50 mm). Par contre, à partir d'un certain niveau de bombage, l'étanchéité ne s'améliore plus. Cette expérimentation confirme bien le passage d'air préférentiel par les faces planes (Gaillard *et al.*, 1989). Les balles de fourrage sont, quant à elle, le plus souvent suffisamment bombées, ce qui assure une bonne étanchéité.

Tableau 25 : Différences de pression à la rupture (ΔPr) selon la forme des faces planes

caractéristiques	film C				film G	
position des flasques (mm)	0	50	75	100	0	75
ΔPr (mbar)	0.52	0.92	1.22	1.01	0.92	1.92
amélioration de l'étanchéité (indice)	100	177	235	194	100	209

II.4.5.2. Incidence du nombre de couches de film sur l'étanchéité

Le nombre de couches influe nettement sur l'étanchéité à l'air des balles enrubannées. En effet, la distance à parcourir par l'air pour atteindre le fourrage devient plus importante : pour un film de 750 mm de largeur, cette distance est légèrement supérieure à 0.75 m pour 4 couches, elle passe à 1.125 m pour 6 couches et à 1.5 m pour 8 couches. De même, l'épaisseur de l'emballage sur les faces planes (x 1.5 et x 2 pour 6 et 8 couches, respectivement) améliore l'étanchéité.

Un essai d'application de 4, 6 ou 8 couches a donc été réalisé sur deux films de 750 mm (C et G). Les flasques de la balle d'expérimentation ont été positionnées à 75 mm de manière à avoir des faces bombées suffisamment étanches. L'amélioration de l'étanchéité par l'augmentation du nombre de couches de film est très nette (tableau 26 ; figure 10). La faible étanchéité d'un film peut être compensée en appliquant davantage de couches, mais le coût et le temps d'enrubannage sont alors augmentés.

Tableau 26 : Différence de pression à la rupture (ΔPr) selon le nombre de couches de film

caractéristiques	film C			film G		
nombre de couches de film	4	6	8	4	6	8
ΔPr (mbar)	1.22	4.72	5.97	1.92	4.08	7.04
amélioration de l'étanchéité (indice)	100	387	489	100	212	367

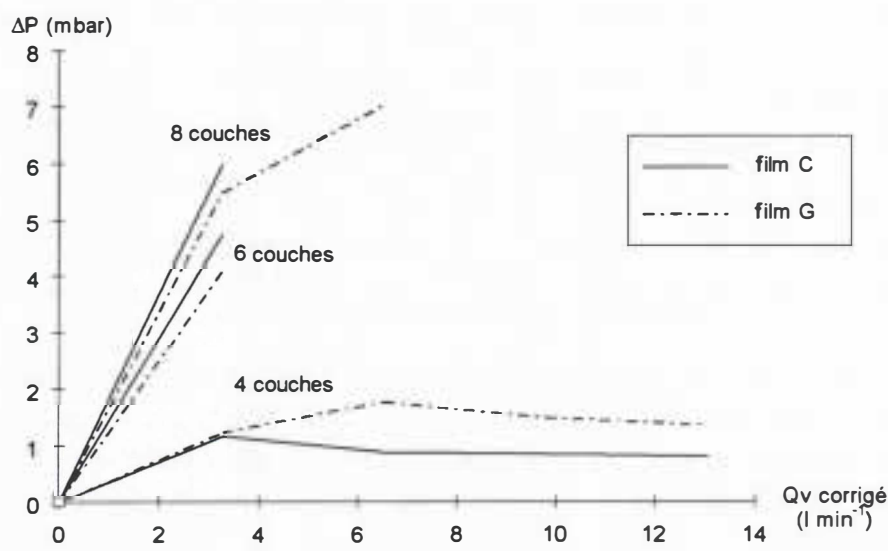


Figure 10 : Etanchéité sur balle d'expérimentation selon le nombre de couches de film (4 - 6 - 8)

II.4.5.3. Effet collant et étanchéité

L'étanchéité de l'emballage est conditionnée par l'adhésivité (ou effet collant) du film (Gaillard, 1989). Pour certains films, l'adhésion n'est pas immédiate, car la colle doit migrer vers la face externe du film sous l'action de la chaleur. Un essai (tableau 27) (annexe C - p 60), faisant varier le temps entre l'enrubannage et le test d'étanchéité, a été conduit avec les films de 750 mm (C et G).

Le film C est un film noir peu collant à l'utilisation. Sous l'effet de la chaleur, il absorbe des rayonnements et sa température augmente, ce qui favorise la migration de la colle. L'étanchéité s'améliore alors nettement avec le temps. Le film G est un film mono-couche vert collant à l'utilisation. Mais, cet effet collant décroît avec le temps et les couches se séparent : phénomène constaté sur les balles témoins en exposition et présenté au chapitre II.5..

Or, l'étanchéité doit être élevée durant toute la conservation de l'ensilage. Une étanchéité plus faible lors de l'enrubannage n'est pas forcément préjudiciable à l'ensilage puisque la respiration et les fermentations provoquent une surpression dans la balle (3^{ème} partie).

Cet essai donne donc des limites au test d'étanchéité utilisé dans les normes N.F. T-54190 et N.F. T-54191. Par exemple, les tests avec les films C et D se sont avérés moyens : Ce proche du seuil de la norme. Après un délai permettant la migration de la colle, ces films présentent de meilleures caractéristiques d'étanchéité, ce qui a été vérifié dans le cas du film C.

Pour la qualification des films étirables, un délai standard, à déterminer, permettrait de tenir compte de l'effet collant du film. Cependant, les tests d'étanchéité avec délai nécessiteront une chambre avec atmosphère contrôlée et une organisation plus contraignante.

Tableau 27 : Différence de pression à la rupture (ΔPr) selon le délai entre enrubannage et test

caractéristiques	film C					film G		
position des flasques (mm)	0	0	75	75	75	75	75	75
délai avant mesures (heures)	0	24	0	16	71	0	22	89
ΔPr (mbar)	0.52	1.38	1.22	2.03	4.53	1.92	1.12	0.86
amélioration de l'étanchéité (indice)	100	265	100	166	371	100	58	45

Un autre aspect de l'effet collant des films étirables est la possibilité "d'auto-réparation" du film. Trois tests d'étanchéité successifs ont été réalisés sur le même emballage (balle d'expérimentation) avec le film A étiré en 4 couches. Ce test a été effectué en 1991, au début des essais d'étanchéité, ce qui explique le choix du film A, seul film disponible à La Réunion à cette période.

Le mode opératoire a consisté dans une 1^{ère} mise en pression de la balle jusqu'à la rupture d'étanchéité ; après un repos de 24 h, une 2^{nde} mise en pression a été réalisée ; enfin, après un repos d'une semaine environ, une 3^{ème} mise en pression a été appliquée à la balle.

Ces tests successifs montrent que, suite à une rupture d'étanchéité sous l'influence d'une forte différence de pression, le film a la possibilité de se recoller pour présenter à nouveau, après un certain temps, de bonnes caractéristiques d'étanchéité (figure 11).

La rupture d'étanchéité se faisant entre les couches de film, il y a en fait peu d'altération du film. Si celui-ci est suffisamment collant, l'étanchéité peut être en partie restaurée. Ce point a été vérifié lors des suivis de fermentations (3^{ème} partie) où la pression liée à la respiration est souvent telle que l'emballage subit une rupture d'étanchéité qui se retablit ensuite.

Cette caractéristique du film étirable est intéressante et il conviendrait de répéter l'essai avec d'autres films. Cependant, compte tenu de la durée de l'essai, ce dernier test paraît difficile à mettre en oeuvre dans le cadre des normes N.F. T-54190 et N.F. T-54191.

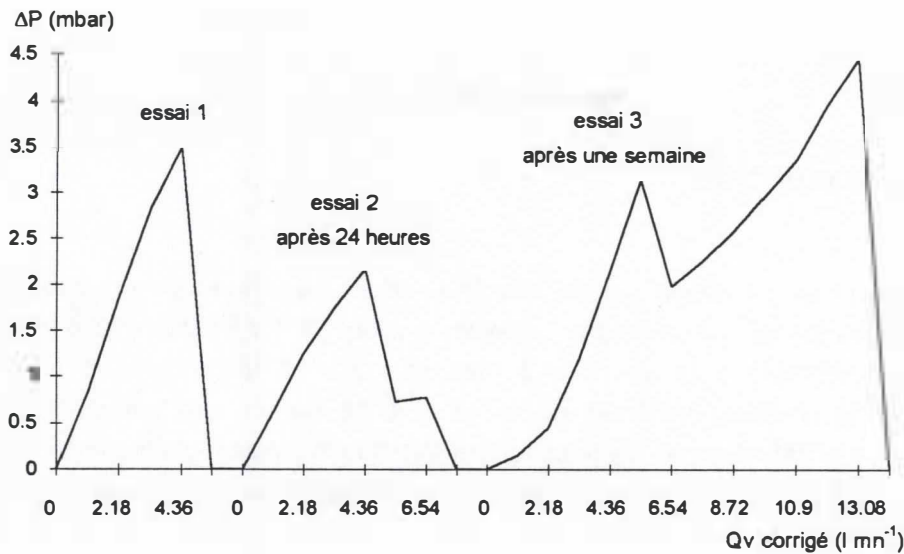


Figure 11 : Tests d'étanchéité successifs avec le film A, sur la balle d'expérimentation

II.4.6. Conclusion

Les mesures d'étanchéité sur la balle d'expérimentation permettent d'apprécier l'aptitude des films étirables à l'enrubannage, elles sont complémentaires des tests effectués par le L.N.E. : élongation, résistance à la perforation, aspect collant, essais en chambre de vieillissement, etc. (Lambert, 1993a).

Ces essais, conduits à La Réunion en liaison avec le CEMAGREF, ont permis de cerner certaines conditions expérimentales de mesures. La comparaison des films entre eux s'avère assez complexe car de nombreux paramètres agissent sur l'étanchéité. Cependant, leur maîtrise permettrait d'affiner la méthode de certification des films étirables dans le cadre des normes N.F. T-54190 et N.F. T-54191 et de la Marque de Qualité.

En outre, plusieurs résultats ont été exposés dans ce paragraphe :

- l'air passe préférentiellement par les faces planes, leur bombage permet d'améliorer notablement l'étanchéité,
- l'augmentation du nombre de couches de film permet une amélioration considérable de l'étanchéité, le coût engendré par l'application de couches supplémentaires devra être raisonné en fonction de la durée de stockage prévue pour l'ensilage,
- dans nos essais, l'étanchéité n'est pas augmentée avec la largeur du film, ce point mérite cependant des essais complémentaires,
- l'effet collant, qui dépend de la température, de la couleur et du type de film conditionne très fortement l'étanchéité,
- une rupture d'étanchéité liée à une surpression momentanée dans la balle provoquant le passage d'air entre les couches de films n'est pas rédhibitoire pour l'étanchéité de l'emballage, dès lors que le film est suffisamment collant.

II.5. Exposition des films étirables

II.5.1. Introduction

L'objectif de l'ensilage est de conserver le fourrage avec le minimum de pertes durant une période plus au moins longue selon les besoins. A La Réunion, la durée du report fourrager est très variable : de un mois à près d'un an. La longévité des films étirables conditionne donc la réussite de l'ensilage et sa stabilité durant une longue période. Pour apprécier ce critère et sélectionner les films adaptés au climat tropical d'altitude de La Réunion, différents films ont été exposés aux conditions atmosphériques, sur cadres, sur balles témoins et sur balles d'ensilage.

II.5.2. Durée de vie sur cadres

II.5.2.1. Régularité d'étirage des films

Afin de cerner l'aptitude des films à l'étirage, les bords des films ont été marqués avec des adhésifs (annexe C - pp 61-62). Avec un étirage de 60 %, la réduction de largeur (environ 25 %) est identique quel que soit le film. Elle est plus variable avec un étirage de 120 % : de 35 à 38 % et de 40 à 44 % pour les films tri-couches et mono-couche, respectivement. Cependant, les rouleaux de pré-étirage des enrubanneuses conservent mieux la largeur du film, d'où une réduction de 20 % seulement, avec un étirage de 60 % (Gaillard *et al.*, 1988). La dissymétrie d'étirage (différence entre les bords du film) est satisfaisante avec un étirage de 60 % (dissymétrie < 10 %) et devient élevée avec un étirage de 120 %, notamment pour les films mono-couche de 500 mm de largeur (dissymétrie > 25 %). L'irrégularité d'allongement s'accroît avec le taux d'étirage. Sous un étirage de 120 %, l'allongement est plus régulier pour les films tri-couches de 500 mm de largeur. Excepté le film C, les films noirs tri-couches paraissent plus aptes à l'étirage.

L'observation par transparence des films étirés confirme ces mesures. En effet, les stries transversales des films mono-couche, où l'épaisseur du film n'est que de quelques microns, alors qu'elle est de 19 μm environ si l'étirage est régulier (Gaillard, 1989), pourraient être préjudiciable à l'étanchéité (phénomène non constaté lors des tests) et à la longévité.

II.5.2.2. Longévité des films

L'exposition sur cadres permet d'apprécier la résistance des films aux conditions climatiques. Les films, les taux d'étirage et les sites d'exposition sont comparés avec la durée de vie jusqu'au déchirement du film (incertitude de ± 15 jours).

Les résultats obtenus sur les deux sites de La Réunion (Plaine des Cafres et S^t Pierre) sont mis en relation avec ceux du CEMAGREF à Montoldre (Gaillard *et al.*, 1993). D'après les observations qualitatives en cours d'exposition, sur le site de S^t Pierre (170 m d'altitude), les films noirs tri-couches présentent des petits trous d'aiguilles et quelques gros trous de plusieurs millimètres, et les films clairs mono-couche présentent de nombreuses stries (§ II.5.2.1.) ; sur le site de Plaine des Cafres (1500 m d'altitude), peu de trous ont été observés.

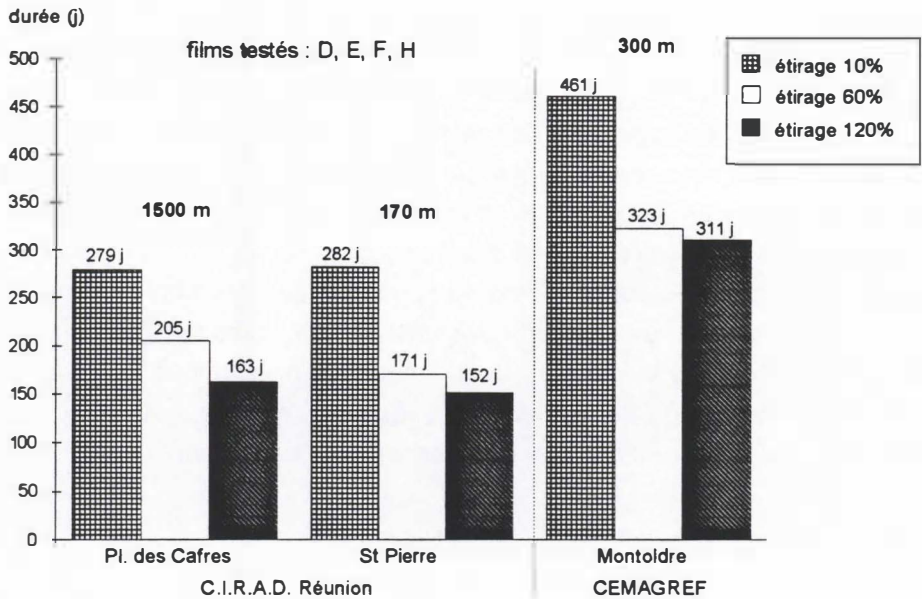


Figure 12 : Influence du taux d'étirage et du site d'exposition sur la durée de vie des films

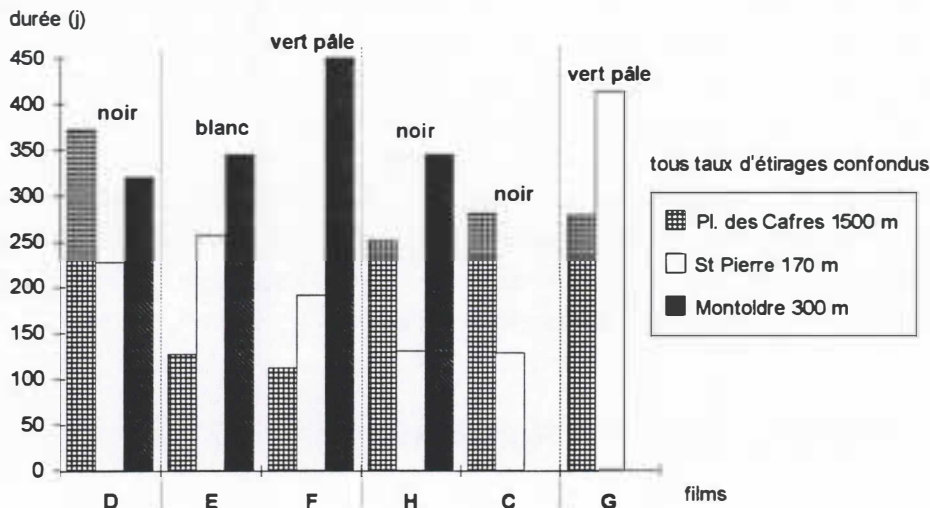


Figure 13 : Comparaison de la durée de vie des films selon les sites d'exposition et influence de la couleur (annexe C - tableau C6 - p 63)

La durée de vie moyenne sur les sites de La Réunion est très nettement inférieure à celle observée en métropole (figures 12 et 13). En liaison avec la diminution d'épaisseur de 25 à 19 μm (Gaillard, 1989), l'étirage accélère le vieillissement des films. Cette observation est notable pour les films clairs mono-couche E et F à la Plaine des Cafres et pour les films noirs tri-couches D, H et C à St Pierre, la durée de vie du film G restant quasi constante quel que soit le taux d'étirage. Le doublement de l'étirage de 60 à 120 % accélère peu le vieillissement.

A la Plaine des Cafres, les films noirs tri-couches ont la durée de vie la plus longue, et cette durée varie peu avec le taux d'étirage. A S^t Pierre, les films clairs mono-couche ont la plus grande longévité qui diminue, cependant, avec le taux d'étirage (figure 13).

Selon le Professeur Lemaire (Université de Clermont-Ferrand, communication personnelle) la durée de vie des films plastiques est liée à la température : au-delà d'une certaine température critique, le film devient cassant et vulnérable. Sur le site de S^t Pierre sous une insolation maximale, la température, prise juste sous le film, atteint 70 °C pour le film noir (valeur confirmée par Daponte, 1991) et 40 °C pour le film blanc. La température sous le film vert pâle, non mesurée, doit être proche de celle du film blanc. La température critique des films noirs serait dépassée, alors que celle des films clairs ne serait pas atteinte, d'où la présence de nombreux trous sur les films noirs qui se dégradent plus vite. En altitude, sur le site de la Plaine des Cafres où les températures ambiantes sont inférieures avec un couvert nuageux qui limite les fortes insulations, la température critique des films noirs serait rarement atteinte, d'où une meilleure résistance et des perforations moins nombreuses. La plus faible longévité des films clairs sur ce site pourraient être liée à la forte proportion d'U.V. dans le rayonnement. Les films clairs sont stabilisés contre les U.V. par l'oxyde de titane (TiO₂), alors que les films noirs le sont avec du noir de méthylène (CH₂) (Gaillard *et al.*, 1988). La qualité de stabilisation pourrait être déterminante sous les fortes expositions aux U.V. rencontrées en altitude.

II.5.2.3. Conditions météorologiques

Les températures (annexe C - pp 63-64) sont bien sûr plus importantes à S^t Pierre (+ 71 % pour la somme des températures moyennes journalières) et le rayonnement global est supérieur de 11 %. En altitude, le rayonnement est différent avec une couverture nuageuse et une proportion d'U.V. plus importantes. L'amplitude thermique est supérieure à la Plaine des Cafres (+ 14 %). Les quantités de pluies ont été identiques dans les deux sites, avec des pluies plus rares et violentes à St Pierre. C'est la température qui différencie le plus les deux sites d'exposition. Ces données météorologiques n'apportent pas d'éléments supplémentaires pour comparer les taux d'étirages et les films entre eux. La durée de vie peut être considérée comme un élément synthétique intégrant l'ensemble des données climatiques, qui pourraient cependant servir à la mise au point des tests en chambre de vieillissement (Lambert, 1993a).

II.5.3. Observations sur balles témoins

L'avantage des balles témoins par rapport à l'exposition sur cadres, est l'observation, en conditions comparables, du comportement des emballages, et non seulement des films. Ce test final permet d'accorder la certification aux films après 14 mois d'exposition naturelle (Gaillard, 1994). L'inconvénient de cette méthode est sa difficulté de mise en oeuvre sur les sites de La Réunion. Outre, l'observation, il était prévu sur ces balles, un suivi de l'étanchéité dans le temps. Malheureusement, les conditions de mesure se sont avérées difficiles à fixer, car, en atmosphère extérieure, malgré l'ombrage sous bâche, les différences de pression sont tributaires des variations d'ensoleillement.

Au CEMAGREF, les balles sont transportées dans un local de mesure. A la Réunion, cette manipulation aurait nécessité des démontages de l'ancrage anticyclonique et l'aménagement d'un local spécial à S^t Pierre. Une mesure de différence de pression maximale (ΔP_m), enregistrée durant une période de 15 min environ, a cependant été réalisée (tableau 28).

Tableau 28 : Différences de pression maximale (moyenne de deux balles témoins) sous un débit corrigé de 2.55 l min⁻¹ d'air sec (Hr = 10 %) pour différents films, après 80 jours d'exposition

films	D	E	F	H	C	G
ΔP_m (mbar)	1.32	0.75	0	1.26	0.96	0.32

Ce seul essai ne permet pas d'appréhender la variation d'étanchéité avec le temps. Les différences de pression obtenues, en accord avec les observations des emballages, infirment le comportement des films sur cadres. En effet, sur les balles témoins, c'est le pouvoir collant, et non la résistance à l'étirage, qui est le principal facteur de longévité. Les films blanc et verts mono-couche (E, F et G) se décollent rapidement (photo 6 - p 84). Les films noirs tri-couches (H et C) restent collants mais la 1^{ère} couche se dégrade sur la face plane supérieure (insolation maximale). Les couches du film noir tri-couches D deviennent indissociables formant une enveloppe durablement étanche. Seul le film D a résisté après deux ans d'exposition.

II.5.4. Observations sur balles d'ensilage

Le film A (tri-couches blanc) s'est rapidement déchiré après 6 mois dans les Hauts de l'Ouest, 5 mois à la Plaine des Palmistes et 3 mois à S^t Pierre. Le film B (tri-couches noir) ne s'est pas déchiré, mais a commencé à se déliter après 6 mois dans les Hauts de l'Ouest et à la Plaine des Palmistes, et après 10 mois à la Plaine des Cafres. Il s'est déchiré après 5 mois à S^t Pierre. Les observations de 1992 à la Plaine des Palmistes confirment les phénomènes observés sur balles témoins à S^t Pierre (§ II.5.3.) : après seulement 4 à 5 mois, décollement des couches sur les films blanc et verts (E, F et G), et au bout de 9 mois, déchirement complet pour les films E et F, et début d'usure sur le sommet de la balle pour les films noirs (C, D et H).

II.5.5. Conclusion

Les suivis des films exposés dans différents sites pendant de longues périodes ont permis de cerner les conditions d'utilisation des films étirables sous climat tropical, et en altitude. Les films noirs et tri-couches, et particulièrement le film D, semblent répondre le mieux à ces conditions. Les films clairs et mono-couche ne présentent pas une longévité suffisante en milieu tropical. D'un point de vue méthodologique, bien que les différents tests donnent une part d'information sur l'aptitude des films à résister aux conditions climatiques, l'exposition sur balles témoins sur une très longue période (2 ans) paraît la méthode la plus apte à comparer les films entre eux. L'exposition dans différents sites est également primordiale, tant les conditions peuvent varier d'une région à l'autre, notamment en zone de montagne.

II.6. Conclusion sur l'étanchéité de l'enrubannage

Dans cette partie, plusieurs points ont été présentés. Tout d'abord, la chaîne de mesures avec les capteurs et les différents matériels qui la composent, chacun des appareils utilisés ayant été étalonnés, pour connaître les corrections éventuelles à apporter et les erreurs de mesures commises. Il était important de décrire cette chaîne de mesures car elle est utilisée, non seulement dans les tests d'étanchéité présentés dans cette partie, mais également pour le suivi des fermentations intervenant dans les balles enrubannées (3^{ème} partie).

Ensuite, la modélisation (annexe C - pp 55-58) a permis de cerner l'influence des conditions atmosphériques sur les mesures de différences de pression. Les variations de température et d'humidité de l'air ont une influence relativement faible (différence de 2 à 3 % entre le site de Montoldre en métropole et le site de S^t Denis de La Réunion). Par contre, l'altitude est très influente (différence de 10 % entre le site de S^t Pierre à 170 m d'altitude, et le site de Plaine des Cafres à 1500 m d'altitude). La pression au niveau de la mer n'est susceptible d'intervenir que lorsqu'elle varie beaucoup par rapport à la pression atmosphérique normale (1013 hPa), ce qui n'est pas le cas hors périodes dépressionnaires intenses (cyclones). De plus, les essais sur fût étanche ont permis de mieux comprendre les phénomènes liés à l'étanchéité des emballages de film étirable.

Enfin, il est possible de retenir différents tests complémentaires permettant de caractériser les films étirables en fonction des conditions d'emploi, liées au site d'exposition. Effectués avec plusieurs répétitions (3 au minimum), dans une enceinte avec conditions atmosphériques contrôlées, et en prenant en compte plusieurs débits (montée en pression), les tests d'étanchéité permettent, s'ils sont effectués après un certain délai post-enrubannage, de comparer l'étanchéité de l'enrubannage réalisé avec différents films. En outre, l'augmentation ou la diminution avec le temps de l'effet collant du film peuvent être caractérisées avec cette méthode. Les expositions sur cadres, balles témoins et balles d'ensilage, bien que leurs résultats soient longs à obtenir, sont très importantes pour sélectionner des films aptes à l'étirage et assurant une étanchéité durable. Dans ces essais, la durée de vie du film semble être le critère synthétique le plus facile à traiter.

Ces divers résultats, concernant l'étanchéité de l'enrubannage, permettent de mieux connaître les films étirables en conditions difficiles d'utilisation (climat tropical et conditions d'altitude) et apportent une contribution à la méthodologie de leur certification. Des études plus complètes seraient nécessaires pour cerner les paramètres climatiques agissant sur l'usure des films et les simuler en enceinte de vieillissement. La Marque de Qualité "film étirable", pourrait alors être enrichie de labels d'aptitude à l'emploi pour différentes régions (Europe du Nord, Europe du Sud, zones tropicales, zones d'altitude ...).

Actuellement, parmi les films testés à La Réunion, le film D s'est avéré le plus satisfaisant. Son utilisation est maintenant systématique depuis le début 1994, en largeur de 500 mm ou le plus souvent de 750 mm. Peu de problèmes ont été rencontrés chez les éleveurs avec ce film, si ce n'est des ruptures d'étanchéité occasionnelles liées au non respect de l'application des quatre couches indispensables.

3^{ème} Partie :

PROCESSUS FERMENTAIRES ET QUALITE DE CONSERVATION DES ENSILAGES EN BALLES ENRUBANNEES

III.1. Introduction

Les première et seconde parties nous ont permis de caractériser les conditions de réalisation des ensilages en balles enrubannées à La Réunion, liées aux fourrages, aux conditions de dessiccation et à la technique d'enrubannage.

Cette 3^{ème} partie a pour objet d'étudier les fermentations en jeu et les différents facteurs pouvant intervenir sur celles-ci. En effet, selon l'aptitude à l'ensilage des fourrages et les conditions de récolte, les fermentations vont différer et conduire à des ensilages plus ou moins bien conservés. Ce sont donc les résultats de conservation des ensilages que nous présentons ici.

La démarche proposée procède tout d'abord d'une étude globale des ensilages en balles enrubannées réalisés chez les éleveurs des Hauts de l'île, puis de différentes expérimentations permettant de mieux cerner certains facteurs de conservation.

Le premier chapitre est consacré aux matériels et méthodes utilisés et s'attache à décrire les différents dispositifs expérimentaux mis en place : suivis de fermentation en laboratoire et essais au champ.

Dans le second chapitre, nous rendons compte des résultats d'enquêtes sur la conservation des ensilages en balles enrubannées réalisés durant quatre années, par des analyses descriptives multidimensionnelles, complétées d'une approche des différences régionales constatées.

Le troisième chapitre présente l'étude de différents facteurs intervenant sur les fermentations : influence de l'espèce fourragère, de la teneur en MS, de l'apport de sucres solubles, de l'apport de conservateurs chimique ou biologique et de la couleur du film étirable.

Enfin, le dernier chapitre permet de comparer de façon succincte la conservation des ensilages réalisés avec différentes techniques d'ensilage pratiquées depuis une douzaine d'années à La Réunion.



Photo 7 : Carroteuse cylindrique pour le prélèvement des échantillons



Photo 8 : Epandage de mélasse par gravité, sur l'andain, avec une cuve de 700 l

III.2. Matériels et méthodes

III.2.1. Dispositifs d'essais

III.2.1.1. Enquêtes sur la conservation des ensilages réalisés chez les éleveurs des quatre principales régions d'élevage

Durant les quatre premières campagnes d'ensilage, 60 chantiers ont été suivis : 21 en 1990, 33 en 1991, 1 en 1992 et 5 en 1993. Les données enregistrées, mesurées ou calculées dans cette enquête concernent tout d'abord les caractéristiques générales des chantiers :

- région (1 = Hauts de l'Ouest, 2 = Plaine des Cafres, 3 = Plaine des Palmistes, 4 = Hauts du Sud) (figure 1 - p 14),
- année (codifiée à travers le numéro d'échantillon),
- saison de récolte (1 = été pour les mois de décembre à mars, 2 = automne pour les mois d'avril et mai, 3 = hiver pour les mois de juin à septembre), aucun chantier n'a eu lieu au printemps en 1990 et 1991 et peu de chantiers ont été suivis en 1992 et 1993,
- espèce dominante récoltée (1 = espèces assez faciles à ensiler telles que ray-grass ou brome, 2 = espèces assez difficiles telles que dactyle ou fétuque, 3 = espèces difficiles telles que kikuyu ou autres espèces tropicales diverses).

Ensuite, ont été codifiées les conditions de récolte :

- apport de lisier avant récolte (0 = non, 1 = oui),
- proportion d'espèces tempérées (%) calculée à partir d'un rapide relevé botanique,
- stade végétatif de récolte (1 = feuillu, 2 = montaison, 3 = début d'épiaison, 4 = épiaison, 5 = floraison ou beaucoup de stolons pour le kikuyu),
- rendement en MS ($t\ ha^{-1}$) calculé à partir de la surface fauchée (mesure au topofil), de la teneur en MS du fourrage lors du pressage (étuve), du poids des balles (annexe E - p 84) et du nombre de balles par hectare,
- teneur en MAT ($g\ kg^{-1}\ MS$) (méthode Kjeldhal sur l'ensilage frais),
- conditions météorologiques (1 = beau temps, 2 = nuageux, 3 = couvert, 4 = pluie),
- conditions de mécanisation permettant d'apprécier les conditions d'évolution des machines et regroupant l'aptitude de la parcelle à la mécanisation et du fourrage à la récolte (1 = facile, 2 = assez facile, 3 = assez difficile, 4 = difficile),
- fanage (0 = non, 1 = oui),
- apport de sucres solubles sous forme de mélasse (% de MS),
- durée de conservation (jours).

Enfin, pour chacun des chantiers, 4 à 5 balles, en moyenne, ont été échantillonnées avec une carotteuse (photo 7 - p 104), à raison d'un échantillon par balle ; au total les 226 échantillons prélevés ont été analysés au laboratoire du C.I.R.A.D. pour déterminer leurs teneurs en produits de fermentation (caractéristiques fermentaires)

III.2.1.2. Etude de l'influence de différentes teneurs en MS et de différentes additions de sucres solubles

En décembre 1993, à la Plaine des Palmistes (1000 m), un dactyle, au stade épiaison, présentant une teneur en MAT faible ($78 \text{ g kg}^{-1} \text{ MS}$) et avec un rendement en MS assez variable (entre 3 et 5 t ha^{-1}) a été récolté. Sa teneur en glucides solubles est élevée ($65 \text{ g kg}^{-1} \text{ MS}$), relativement aux valeurs mesurées à La Réunion, mais en accord avec la saison (§ I.3.3. - p 58). Son pouvoir tampon (McDonald, 1962) est faible ($\text{PT} = 39 \text{ mg g}^{-1}$). L'épandage de mélasse sur andains (photo 8 - p 104) devait correspondre un 2 apports différents de sucres solubles (0 et $40 \text{ g kg}^{-1} \text{ MS}$) pour les 4 traitements. Suite à une erreur de manipulation, certaines balles des traitements T2 et T3, qui n'auraient pas dû recevoir de mélasse, ont reçu un apport de sucres solubles de $20 \text{ g kg}^{-1} \text{ MS}$. Les 24 balles réalisées ont été échantillonnées (tableau 29).

Tableau 29 : Dispositif de l'essai "MS - mélasse" sur du dactyle récolté au stade épiaison à la Plaine des Palmistes en décembre 1993

identification du traitement	T1	T2	T3	T4
durée de dessiccation (h)	1	4	7	26
teneur en MS visée (%)	25	28	35	50
apport de sucres solubles par la mélasse*	40 (4)	40 (3)	40 (2)	40 (3)
($\text{g kg}^{-1} \text{ MS}$)	0 (3)	20 (3)	20 (3)	0 (3)

* = nombre de balles réalisées en caractères italiques et entre parenthèses

III.2.1.3. Etude de l'influence de l'addition de conservateurs et de sucres solubles sur deux fourrages récoltés à deux teneurs en MS

L'objectif de cet essai est de déterminer l'action de deux types de conservateur et de différentes additions de mélasse sur des fourrages difficiles à ensiler (dactyle et kikuyu) ayant des teneurs faibles en MS. La comparaison a nécessité quatre essais (2 fourrages x 2 teneurs en MS) dans un même site à la Plaine des Cafres (1500 m), de mars à juin 1993 (tableaux 30, 31, 32). Les deux conservateurs employés sont :

- un inhibiteur de fermentation : commercialisé par Pionner France, le Foraform® est un tétraformiate d'ammonium (TFA) qui se dissocie au contact de l'eau du fourrage. Ce sel d'acide est équivalent à 640 g kg^{-1} d'acide formique et peut libérer de l'azote sous forme ammoniacale jusqu'à 49 g kg^{-1} .

- un stimulant biologique de fermentation : fabriqué et commercialisé par Cayla, le Caylasil® est composé de bactéries lactiques homofermentaires (*Streptococcus faecium* = $1.8 \cdot 10^9 \text{ UFC g}^{-1}$ et *Lactobacillus plantarum* = $10^{10} \text{ UFC g}^{-1}$), et d'enzymes (hemicellulases = $2 \cdot 10^6 \text{ UI l}^{-1}$ et cellulases = $1.5 \cdot 10^6 \text{ UI l}^{-1}$). A la dose préconisée par le fabricant (1 kg de bactéries et 2l d'enzymes pour 20 tonnes de MV), l'apport de bactéries et d'enzymes correspond à $5.9 \cdot 10^5 \text{ UFC g}^{-1} \text{ MV}$ et $0.35 \text{ UI g}^{-1} \text{ MV}$, respectivement.

Une pompe à acide (Mazurkiewick), montée sur la presse et équipée d'une buse miroir anti-goutte, a permis d'épandre les conservateurs (acide et produit biologique) sur l'andain, en avant du pick-up (photo 9 - p 108). Des cinétiques d'acidification avec du TFA, ont été réalisées au laboratoire sur chaque fourrage fraîchement coupé peu de temps avant la date du chantier. A partir de ces résultats, la dose de TFA a été réglée pour atteindre un pH de 4.2 (traitement T4) ou de 4.6 (traitement T5). Caylasil® a été employé à la seule dose préconisée. Différentes doses de sucres solubles ont été apportées : 0, 50 et 100 g kg⁻¹ MS. Le témoin est sans conservateur et avec un apport de sucres solubles de 100 g kg⁻¹ MS (traitement T6).

Tableau 30 : Dispositif de l'essai conservateurs - caractéristiques des fourrages à la fauche

caractéristiques	D1	D2	K1	K2
date de récolte	17/03/93	8/06/93	19/04/93	25/05/93
espèce	dactyle	dactyle	kikuyu	kikuyu
stade	feuillu	feuillu	stolons	feuillu
teneur en MS (%)	20.8	29.6	20.0	22.0
teneur en MAT (g kg ⁻¹ MS)	119	158	86	153
glucides solubles (g kg ⁻¹ MS)	28	68	25	31
pouvoir tampon (mg g ⁻¹ MS)*	36	38	25	28
rendement en MS (t ha ⁻¹)	5.2	2.1	7.2	5.2

* = acide lactique 0.1N (McDonald, 1962)

Tableau 31 : Dispositif de l'essai conservateurs - caractéristiques des traitements appliqués

identification du traitement	T1	T2	T3	T4	T5	T6
TFA (l t ⁻¹ MV)				4 à 6	2 à 3	
Caylasil®	oui	oui	oui			
apport sucres solubles (g kg ⁻¹ MS)	0	50	100	0	50	100

Tableau 32 : Dispositif de l'essai conservateurs - quantités épandues sur les andains

apports	traitements	D1	D2	K1	K2
enzymes (UI g ⁻¹ MV)	T1, T2, T3	0.45	0.44	0.34	0.38
bactéries (UFC g ⁻¹ MV)	T1, T2, T3	8.0 10 ⁵	7.1 10 ⁵	5.5 10 ⁵	6.1 10 ⁵
TFA (l t ⁻¹ MV)	T4	4.8	5.8	3.9	4.7
TFA (l t ⁻¹ MV)	T5	2.6	3.0	1.9	3.3
sucres solubles (g kg ⁻¹ MS)	T2, T5	70	50	50	50
sucres solubles (g kg ⁻¹ MS)	T3, T6	120	80	70	70

Les prélèvements pour analyses fermentaires ont été effectués un mois après la récolte sur 5 balles par traitement, à raison d'un échantillon par balle. Le faible rendement fourrager du dactyle D2 récolté en juin n'a permis de réaliser que 3 balles par traitement.



Photo 9 : Epandage sur l'andain de conservateur acide (TFA) ou biologique (Caylasil®)

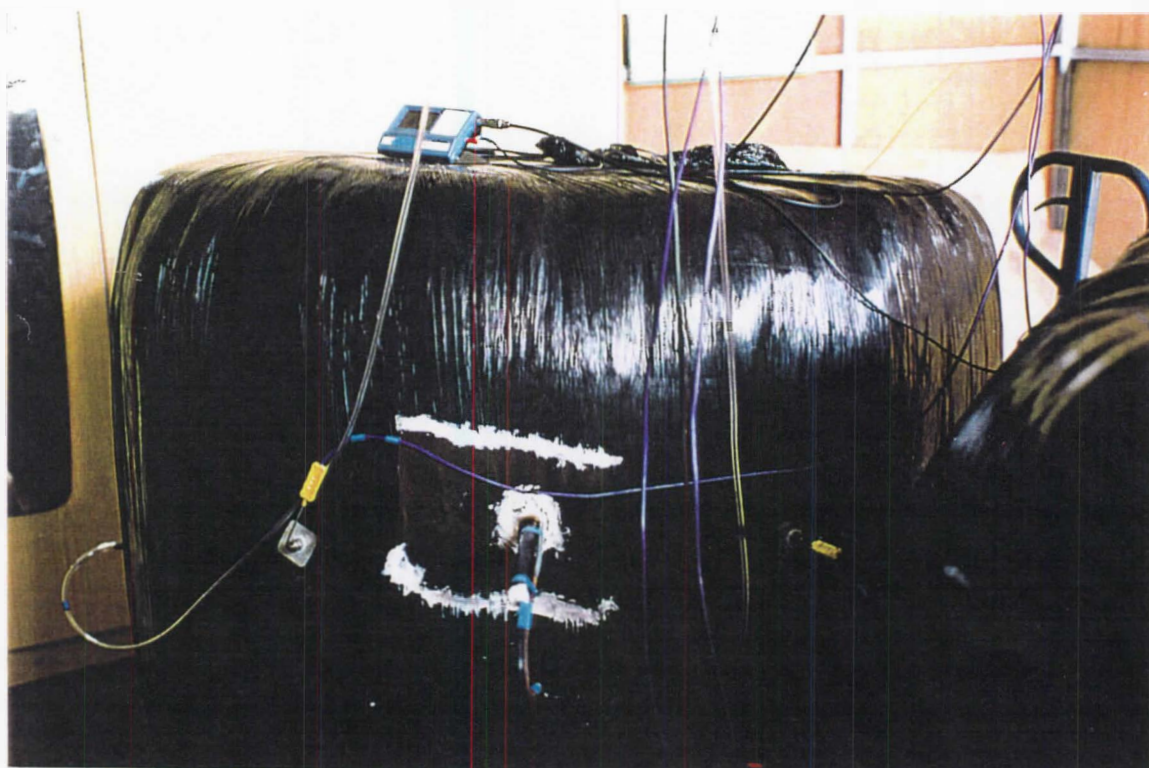


Photo 10 : Disposition des sondes dans la balle pour le suivi fermentaire

III.2.1.4. Suivi des fermentations en laboratoire

Fourrages étudiés et confection des balles enrubannées

Réalisés en laboratoire au C.I.R.A.D., les suivis du processus d'acidification de l'ensilage consistent à comparer deux balles enrubannées (A et B) confectionnées avec deux traitements différents. Sept comparaisons (tableau 33) ont pu être effectuées en 1992 et 1993. Après le pressage, des plaques métalliques taraudées, protégées par un tapis de caoutchouc, sont fixées dans le fourrage sur la face cylindrique de la balle (annexe D - p 67). Les balles, enrubannées avec 6 couches de film, sont posées sur une palette et chargées sur camion.

Tableau 33 : Caractéristiques des balles enrubannées réalisées pour la comparaison des cinétiques de fermentation

type d'essai	identi- fication	espèce stade	teneur en MS (%)	apport en SS (g kg ⁻¹ MS)	
				balle A	balle B
mélasse	F3	dactyle - feuillu	18	0	150
	F4	RGH - dactyle - kikuyu	40	0	80
conservateur biologique	F5	dactyle - feuillu	21	70*	130
	F6	kikuyu - stolons	22	40*	70
	F7	kikuyu - feuillu	23	50*	60
	F8	dactyle - feuillu	31	50*	80
teneur en MS	F9	dactyle - épiaison	30 - 48	40	40
				MS = 30%	MS = 48%

SS = sucres solubles ; * = + Caylasil® à la dose préconisée par le fabricant

Mesures en cours de fermentation

A S^t Denis, après un transport de 1h30, les balles sont pesées (annexe D - p 67). Différentes sondes (photo 10 - p 108) sont fixées par les taraudages. Un système d'étoupe avec joints et mastic réalise l'étanchéité. Les paramètres suivants sont mesurés (11 mesures) :

- Hr : humidité ambiante (§ II.2.1.1. - p 81),
- Ta : température ambiante (référence de la centrale),
- Ts : température à la surface des balles (sonde "pastille" § II.2.1.1. - p 81),
- T20A et T20B : températures à 20 cm dans chaque balle (sondes "aiguille" § II.2.1.1.),
- T50A et T50B : températures à 50 cm dans chaque balle (sondes "aiguille" § II.2.1.1.),
- pH_A et pH_B : pH mesurés dans chaque balle avec des sondes de pénétration Xérolyt® (Ingold), placées à 20 cm dans la balle et connectées à des pH-mètres portatifs (Schott) délivrant des signaux analogiques (mV) enregistrables par la centrale (§ II.2.1.2. - p 81),
- ΔPA et ΔPB : différences de pressions mesurées dans chaque balle par deux capteurs Sedeme (§ II.2.1.1. - p 80) reliés aux balles par des tuyaux en PVC souple ; les mesures sont réalisées par un capteur 0 - 2 mbar et un capteur 0 - 50 mbar, de manière à garder une bonne précision (0.004 mbar pour le premier capteur et 0.1 mbar pour le second) tout en couvrant une grande étendue de mesure.

Les mesures démarrent dès que l'étanchéité des sondes est assurée, soit 4 à 5 heures après le pressage. Le programme de mesure de la centrale 21X (§ II.2.1.2. - p 81) permet la scrutation des différents capteurs toutes les 30 minutes en début de fermentation, puis toutes les heures après 4 à 5 jours de fermentation. Cette scrutation s'effectue de la manière suivante :

- mesures des 9 premiers paramètres : Hr, Ta, Ts, T20A, T20B, T50A, T50B, pH_A, pH_B,
- prise de différence de pression avec l'extérieur (zéro) : ΔP_{2mO} et ΔP_{50mO} ,
- basculement du circuit de pression par une première électrovanne sur la balle A, puis, après un délai de 10 s nécessaire à l'équilibre, mesure de la différence de pression dans la balle A : ΔP_{2mA} et ΔP_{50mA} , retour sur le circuit "extérieur",
- attente de 5 s et basculement du circuit de pression par une seconde électrovanne sur la balle B, puis après un délai de 10 s nécessaire à l'équilibre, mesure de la différence de pression dans la balle B : ΔP_{2mB} et ΔP_{50mB} ,
- enfin, les électrovannes basculent le circuit sur l'extérieur (zéro des capteurs) et la centrale effectue les calculs des différences de pression corrigées :
si $\Delta P_{50mA} < 2 \text{ mbar}$, alors $\Delta P_A = \Delta P_{2mA} - \Delta P_{2mO}$, sinon $\Delta P_A = \Delta P_{50mA} - \Delta P_{50mO}$
si $\Delta P_{50mB} < 2 \text{ mbar}$, alors $\Delta P_B = \Delta P_{2mB} - \Delta P_{2mO}$, sinon $\Delta P_B = \Delta P_{50mB} - \Delta P_{50mO}$

Mesures après fermentation

Après 3 à 4 semaines d'enregistrement, les données sont transférées sur ordinateur pour imprimer les courbes caractéristiques de l'évolution des paramètres de fermentation.

Les différences de pression ne sont pas comparables car l'étanchéité des balles peut être très différente. Une seconde manipulation consiste alors à injecter de l'air sec contrôlé par les débitmètres (§ II.2.1.1.) dans chacune des balles, afin de caractériser l'étanchéité par une fonction $\Delta P_{\text{air}} = f(Q_{V_{\text{air}}})$. En faisant l'hypothèse que l'étanchéité des balles a peu varié durant la fermentation, cette fonction, appliquée aux mesures de différences de pression enregistrées, permet d'avoir une idée des débits de gaz ($Q_{V_{\text{tracé}}}$) durant les fermentations et de comparer les deux balles. Une correction supplémentaire, liée à la différence de masse volumique (annexe C - p 58), doit être effectuée pour faire correspondre les débits d'air à des débits de CO₂, principal gaz issu des fermentations : $\Delta P_{\text{CO}_2} = 1.122 \Delta P_{\text{air}}$ et $Q_{V_{\text{CO}_2}} = 0.9 Q_{V_{\text{tracé}}}$.

La somme des débits de fuite durant le temps de fermentation donne une idée des volumes et masses de gaz dégagés ; étant donné le délai entre le pressage et le début des enregistrements, nous avons considéré que durant cette période le débit de fuite était maximal. Cependant, ces quantités sont largement sous-estimées, car il y a souvent rupture de l'étanchéité de l'emballage à cause de la respiration (production de CO₂ et élévation de température) ; l'étanchéité se reformant ensuite lorsque la pression décroît (§ II.4.5.3.).

Une pesée après fermentation est effectuée dans les mêmes conditions que la première pesée. Par différence, on obtient la perte de poids des balles qui correspond à la perte de matière sèche sous forme de gaz (CO₂ principalement, H₂, N₂, NH₃, l'oxygène entrant dans la balle "poreuse" est probablement totalement consommé) moins la quantité d'eau synthétisée au cours des fermentations (aucun écoulement de jus n'a été observé sur les balles). Les pertes en MS sont donc supérieures aux pertes en poids.

Pour estimer le volume d'air contenu dans les balles à partir des pesées, il est nécessaire de connaître la densité réelle de la matière sèche. Une expérimentation basée sur l'évacuation de l'air contenu dans du fourrage humide par pressage à haute densité (8000 kPa), puis séchage à l'étuve pour déterminer les fractions MS et eau, en tenant compte de la quantité et de la densité du jus excrété, a donné la valeur de 1.7 g cm^{-3} . A partir d'une revue bibliographique et de ses essais, Wattiaux *et al.* (1993) donne des valeurs comprises entre 1.3 et 1.9 g cm^{-3} selon les méthodes utilisées, le type de fourrage et la taille des particules. Pitt *et al.* (1993) donne $\rho_{\text{max}} = 3000 / (3 - \text{MS})$ (ρ_{max} densité en kg m^{-3} et MS en %), ce qui correspond à 1.5 g cm^{-3} pour la MS. Dans nos calculs, nous avons retenu la valeur de 1.5 g cm^{-3} , assez proche des résultats de notre expérimentation et en accord avec la bibliographie.

Prélèvement d'échantillons

Trois échantillons, sont prélevés jusqu'à la profondeur de 60 cm à des endroits répartis tout autour de la balle : un à mi hauteur, un en haut et un en bas. Les caractéristiques fermentaires et le nombre de spores butyriques sont déterminés par les analyses.

III.2.2. Prélèvements et analyses

III.2.2.1. Echantillonnage

L'échantillonnage des balles se fait au hasard parmi les balles réalisées par l'éleveur, en prenant garde de ne pas prélever des balles ayant subi des accidents (trous, déchirures du film ...). Une carotteuse cylindrique de 60 mm de diamètre et 600 mm de longueur, munie de dents de scie à l'extrémité et entraînée par une tronçonneuse Stihl équipée d'un dispositif de perçage, est introduite perpendiculairement à la face cylindrique de la balle (Delacroix *et al.*, 1992) (photo 7 - p 108).

La masse de l'échantillon varie de 400 à 1200 g environ selon la teneur en MS et la densité des balles. Après homogénéisation dans un grand récipient, trois sous-échantillons sont constitués : 10 % pour la détermination de la contamination en spores butyriques, 30 % pour la détermination de la teneur en MS, 60 % pour les analyses sur le frais. Les ensilages prélevés sont acheminés au laboratoire en boîte isotherme et congelés dès leur arrivée.

III.2.2.2. Analyses

Les méthodes d'analyses utilisées par le laboratoire C.I.R.A.D., participant au réseau B.I.P.E.A.⁶⁶ pour les ensilages, suivent en grande partie les recommandations I.N.R.A. (Dulphy et Demarquilly, 1981a). L'échantillon destiné à la détermination de la teneur en MS est séché (24 heures en étuve à 80°C).

⁶⁶ Bureau InterProfessionnel d'Etudes Analytiques

Conservation des ensilages

L'échantillon destiné à l'analyse en frais est broyé ; un prélèvement de 4 g sert à la détermination de la teneur en MAT (N total x 6.25, méthode Kjeldhal) ; le reste, de poids connu, subit une macération à 4 °C pendant une nuit. Sur le jus issu de la macération, sont réalisées les déterminations suivantes :

- pH avec une électrode Ingold connectée à un pH mètre Schott,
- azote soluble par la méthode Kjeldhal,
- azote ammoniacal par dosage, après dialyse, en colorimétrie Berthelot modifiée ; la méthode inclut un dégazage de l'ammoniac selon la méthode Conway (Dulphy *et al.*, 1981a)
- AGV et alcools par chromatographie en phase gazeuse avec un chromatographe Hewlett Packard équipé d'une colonne Supelco (Demarne, 1992),
- acide lactique par méthode enzymatique avec dosage au spectromètre U.V. (méthode Boehringer) ; cette détermination n'a été réalisée qu'à partir de décembre 1993.

L'échantillon réservé à la détermination du nombre de spores butyriques est acheminé au L.V.D. qui utilise la méthode des dilutions (C.N.E.R.N.A.⁶⁷, 1986). La contamination des ensilages est exprimée par le NPP = nombre le plus probable de spores de *Clostridium* par gramme d'ensilage frais.

III.2.3. Barème de notation

Le barème utilisé (§ 5.2. de la Présentation Générale - p 44) est celui de l'I.N.R.A. auquel une notation a été jointe (tableau 34), afin de proposer une caractérisation synthétique regroupant plusieurs critères d'appréciation des ensilages.

Tableau 34. : Barème de qualification des ensilages d'herbe
(d'après Dulphy et Demarquilly, 1981a)

classe	notation (/20)	AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	N-NH ₃ (% N total)	N soluble (% N total)
excellent	16 - 20	< 330	< 20	0	< 7	< 50
bon	13 - 16	330 - 495	20 - 30	< 5	7 - 8	50 - 55
moyen	10 - 13	495 - 660	30 - 40	< 5	8 - 10	55 - 60
médiocre	7 - 10	660 - 1000	40 - 55	> 5	10 - 15	60 - 70
mauvais	4 - 7	1000 - 1330	55 - 75	> 5	15 - 20	> 65
très mauvais	0 - 4	> 1330	> 75	> 5	> 20	> 75

AGV = acides gras volatils ; C₂ = acide acétique ; C₄ = acide butyrique ; N-NH₃ = azote sous forme ammoniacale

⁶⁷ Centre National de coordination des Etudes et Recherches sur la Nutrition et l'Alimentation

Ce barème permet de définir, pour chacune des caractéristiques fermentaires, les limites des classes d'appréciation et d'y faire correspondre une note variant de 0 à 20 (tableau 34). Les couples (note ; valeur de la caractéristique fermentaire) donnés au tableau 34 permettent de proposer des équations (tableau 35) simplifiant les calculs sur tableur. Une classe intermédiaire a été créée : classe "moyen" pour une note comprise entre 10 et 13, la classe "bon" correspondant alors à une note de 13 à 16.

Lorsque les caractéristiques fermentaires ne sont pas connues, il est aussi possible d'utiliser la liaison pH avec teneur en MS : $\Delta pH = pH \text{ ensilage} - pH \text{ de stabilité}$. Le pH de stabilité a été défini par Wieringa (1969, *in* : Demarquilly, 1979) en fonction de l'activité des *Clostridium* (pH = 3.8 pour une teneur en MS de 15 % et pH = 5.0 pour une teneur en MS de 45 %). L'équation devient alors : $\Delta pH = pH - 0.04 \text{ MS} - 3.2$ (MS exprimée en %).

Tableau 35 : Equations de notation pour chaque caractéristique de conservation

caractéristiques fermentaires	équation de calcul de la note pour chacune des caractéristiques	valeur pour la note		
		0 / 20	10 / 20	20 / 20
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	note (AGV) = - 8.5 Ln (AGV) + 65.0 ± 0.3	2196	673	206
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	note (C ₂) = - 9.1 Ln (C ₂) + 43.2 ± 0.2	118	39	13
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	note (C ₄) = - 2 C ₄ + 20	10	5	0
N-NH ₃ (% N total)	note (N-NH ₃) = - 11.0 Ln (N-NH ₃) - 14.0 ± 1.1	28	11	4.5
N sol. (% N total)	note (N sol.) = - 30.1 Ln (N sol.) - 5.2 ± 0.7	84	60	43
NPP (g ⁻¹ MV)	note (NPP) = - 5 log (NPP) + 25	100000	1000	10
ΔpH	note (ΔpH) = - 10 ΔpH + 10	1	0	- 1

Cinq notes synthétiques sont ensuite calculées à partir des notes de base
note de stabilité = note (ΔpH),
note de conservation = 1/3 note (C₂) + 1/3 note (C₄) + 1/3 note (N-NH₃),
note d'ingestibilité = 1/3 note (AGV) + 1/3 note (C₂) + 1/3 note (N-NH₃),
note de qualité de l'azote = 2/3 note (N-NH₃) + 1/3 note (N soluble),
note d'absence de spores = note (NPP).

III.2.4. Traitement des données

Les données sont traitées comme nous l'avons indiqué au paragraphe I.2.4. p 53 (Philippeau, 1986 ; Dervin, 1988 ; Tomassone, 1988 ; Gouet *et al.*, 1989 ; Tomassone *et al.*, 1989, 1993 ; Marija J. Norusis, 1990 ; Tranchefort *et al.*, 1991 ; Frater *et al.*, 1992 ; Kecler *et al.*, 1993).

III.3. Analyses descriptives de la conservation des ensilages en balles enrubannées réalisés chez les éleveurs de 1990 à 1993

III.3.1. Introduction

Plusieurs analyses multidimensionnelles ont été réalisées à partir des enquêtes (§ III.2.1.1.) sur les ensilages en balles enrubannées confectionnés durant 4 années par les éleveurs des différentes régions. 226 balles ont été analysées pour 60 chantiers réalisés : 75 balles pour 21 chantiers, 108 balles pour 33 chantiers, 43 balles pour 6 chantiers, en 1990, 1991 et 1992 + 1993, respectivement. Trois types de variables qualifiant les ensilages sont distinguées : les conditions de récolte, les caractéristiques fermentaires et les notations.

L'analyse en composante principale permet de visualiser les corrélations entre les différentes variables. Les analyses factorielles des correspondances multiples créent des associations des différentes modalités prises par les variables. Enfin les analyses factorielles discriminantes permettent de cerner les variables les plus influentes sur la qualité des ensilages.

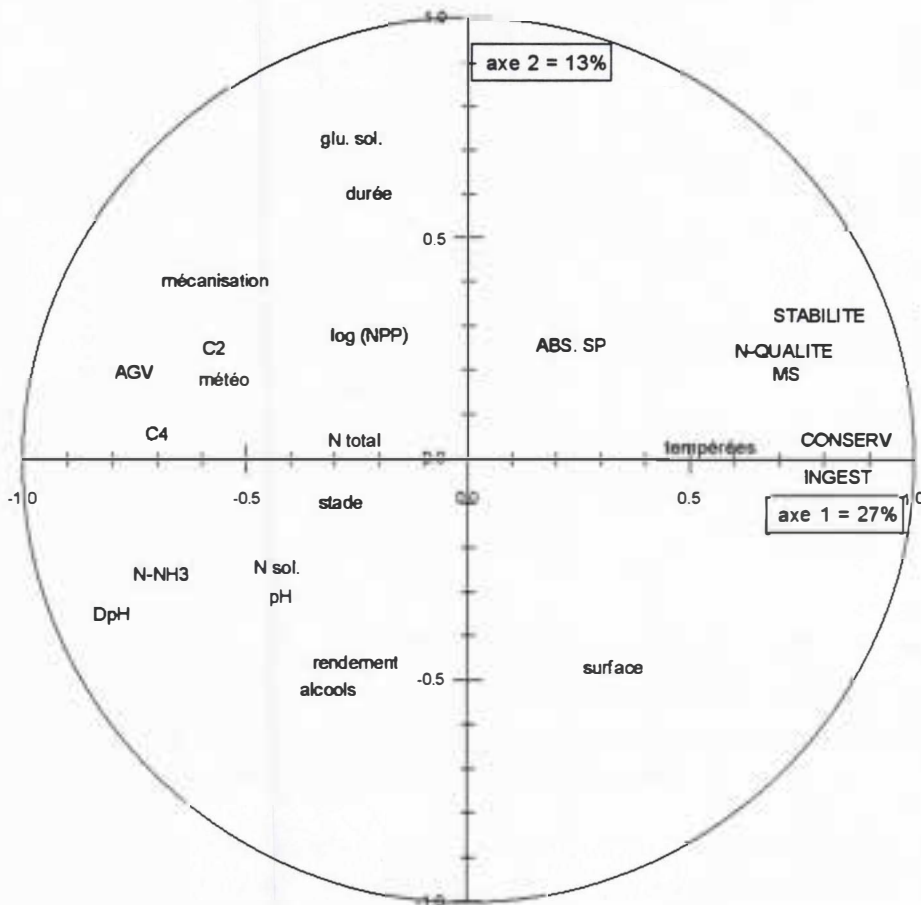
III.3.2. Caractéristiques des ensilages

En excluant les corrélations par construction (pH, MS et Δ pH ; AGV, C₄ et C₂), la matrice des corrélations (annexe D - p 68) montre des liaisons faibles ($r^2 < 0.35$). Les caractéristiques fermentaires sont liées positivement entre elles. Teneur en MS et Δ pH sont les variables clés. Viennent ensuite les teneurs en produits fermentaires (N-NH₃, C₄ et AGV) et les difficultés de mécanisation. Les autres variables gravitent autour de ces principales liaisons.

L'analyse en composantes principales (ACP) permet de mieux visualiser les corrélations existant entre les caractéristiques fermentaires des ensilages et les conditions de récolte (figure 14). Les notations des ensilages (stabilité, conserv, ingest, N-qualité, abs-sp) interviennent en variables supplémentaires. Il en est de même pour la variable log (NPP) en raison du nombre de valeurs manquantes (environ 30). Dans cette analyse, seules les variables quantitatives ou considérées comme telles (échelles de notes) ont été prises en compte.

La dispersion des individus est grande (écart-types importants) et les variables présentent des liaisons faibles entre elles, d'où une faible proportion de variation expliquée : 27, 13 et 10 %, pour les axes 1, 2 et 3, respectivement (figure 14). Néanmoins, le cercle des corrélations donne des indications. Parmi les caractéristiques fermentaires, AGV et Δ pH sont bien représentées dans les plans 1-2 et 1-3 ainsi que N-NH₃, C₄ et C₂. Parmi les conditions de récolte, la teneur en MS, l'apport de sucres solubles et les conditions de mécanisation sont assez bien représentées dans ces mêmes plans. A l'exception de la note d'absence de spores butyriques, toutes les notes sont bien représentées dans ces deux plans.

L'axe 1 définit la qualité de conservation avec une teneur en MS et une proportion d'espèces tempérées élevées du côté des ensilages bien conservés (notes élevées), en opposition à la difficulté de mécanisation et aux mauvaises conditions climatiques du côté des teneurs élevées en produits fermentaires. L'axe 2 est déterminé par l'apport de sucres solubles et la durée de conservation qui n'influent donc pas sur la conservation. L'axe 3 est déterminé par le fourrage (proportion d'espèces tempérées, stade et teneur en MAT). Parmi ces trois variables, seule la proportion d'espèces tempérées influence positivement la conservation.

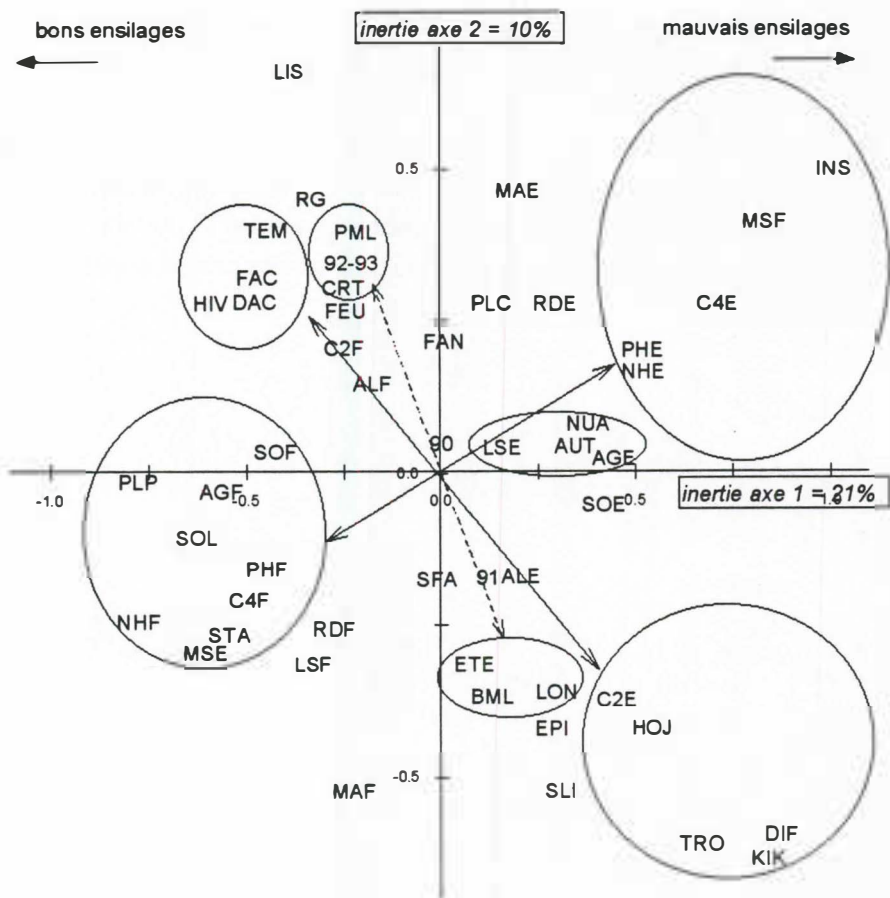


Légende : variables définies § III.2.1.1., III.2.2.2. et III.2.3

Figure 14 : Plan 1-2 de l'analyse en composantes principales (cercle des corrélations) représentant les conditions de récolte, les caractéristiques fermentaires et les notes synthétiques

III.3.3. Relations entre les caractéristiques fermentaires et les conditions de récolte

L'analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) permet de gérer les variables qualitatives (figure 15). Les variables région, saison, année et espèce, déclarées supplémentaires, n'interfèrent pas sur le positionnement des variables actives. Il en est de même pour la contamination en spores butyriques (log NPP) à cause des valeurs manquantes. Les variables sont définies en modalités (annexe D - pp 68-70), constituées d'effectifs proches et tenant compte de valeurs limites, notamment pour les caractéristiques fermentaires.



légende des modalités de variables : annexe D - tableaux D1 à D4 - pp 68-70

Figure 15 : Plan 1-2 de l'analyse factorielle des correspondances multiples représentant les caractéristiques de chantier, les conditions de récolte et les caractéristiques fermentaires des ensilages

Les regroupements ont pu être réalisés grâce à l'observation du plan 1-2 (figure 15) mais en tenant compte des projections dans le plan 1-3. Ces deux plans expliquent 41 % de l'inertie totale (21, 10 et 10 % pour les axes 1, 2 et 3, respectivement). Le plan 1-2 détermine une orientation caractérisant la conservation avec la teneur en MS et une orientation caractérisant les espèces et la difficulté de mécanisation. En fait, ces deux orientations sont confondues dans le plan 1-3. L'axe 1 caractérise donc plutôt la qualité de conservation et l'axe 2 plutôt les espèces et la difficulté de mécanisation. Les variables définissant ces deux axes sont liées entre elles. L'apport de mélasse, la durée de conservation et la saison définissent l'axe 3.

En regardant plus précisément l'orientation "conservation", on note un regroupement à gauche de toutes les variables caractérisant une bonne fermentation des ensilages : pH, Δ pH, proportions de N-NH₃ et N soluble (% N total), teneurs en AGV et C₄, faibles (PHF, STA, NHF, SOF, AGF, C4F). Ces modalités sont associées à une teneur en MS élevée (MSE), à une récolte par beau temps (SOL) et correspondent à la région Plaine des Palmistes (PLP). A l'opposé de ce groupe, les mauvaises fermentations, pH, Δ pH, proportion de N-NH₃ (% N total) et teneur en C₄, élevés (PHE, INS, NHE, C4E), sont associées à la teneur en MS faible (MSF).

L'orientation "espèces et difficulté de mécanisation" se caractérise par un regroupement du côté des ensilages bien conservés, d'une forte proportion d'espèces tempérées (TEM, RG, DAC), avec une récolte facile (FAC) en hiver (HIV). A l'opposé, une forte proportion d'espèces tropicales (TRO), caractérisant la région Hauts de l'Ouest (HOJ) avec du kikuyu (KIK) difficile à récolter (DIF), se trouve liée à une teneur en acide acétique élevée (C2E).

L'orientation "mélasse, durée de conservation et saison" (axe 3) ne donne pas de sens particulier car il n'y a pas de relation de cause à effet. Enfin, les ensilages fortement contaminés en spores butyriques (LSE), bien que mal représentés, tendent vers les ensilages mal conservés et semblent associés à des teneurs élevées en AGV (AGE) et à une récolte en automne (AUT) par temps nuageux à pluvieux (NUA). Il n'y a pas d'opposition nette à ce groupe.

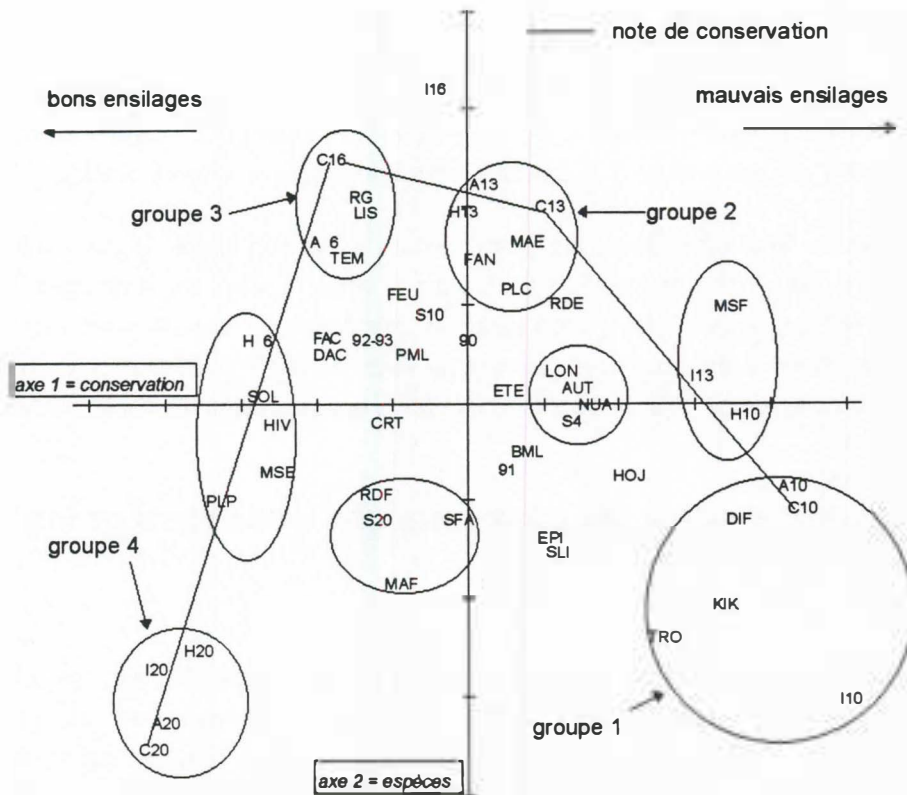
III.3.4. Relations entre les notations des ensilages et les conditions de récolte

Dans cette seconde AFCM, les variables région, saison, année, espèce ainsi que la note de contamination en spores butyriques, étant déclarées supplémentaires, on retrouve les mêmes orientations que dans l'analyse précédente : l'axe 1 rend compte de la qualité de conservation avec la teneur en MS, et l'axe 2 différencie les espèces. Les groupes repérés (figure 16) permettent de caractériser davantage les ensilages en balles enrubbannées.

Le groupe 4 représente les ensilages excellents et stables (C20, I20, A20, H20) associés à aucune modalité directement. Le groupe 3 représente les bons ensilages (C16, A16, et à proximité I16 et H16) associés aux espèces tempérées (TEM, RG) avec apport de lisier (LIS). Entre ces deux premiers groupes, se situent la teneur en MS élevée (MSE), la mécanisation facile (FAC), la récolte en hiver (HIV) et le temps ensoleillé (SOL). L'ensemble de ces critères correspond aux ensilages de la Plaine des Palmistes (PLP).

Le groupe 2 représente les ensilages moyens (C13, A13, H13) associés à la teneur en MAT élevée (MAE) et au fanage (FAN), conditions caractérisant les ensilages de la Plaine des Cafres (PLC). Enfin, le groupe 1 représente les ensilages médiocres (C10, I10, A10, et à proximité H10) associés aux espèces tropicales (TRO, KIK) et à la difficulté de mécanisation (DIF). Entre ces deux derniers groupes, se situe la teneur en MS faible (MSF) avec les ensilages des régions Hauts de l'Ouest et du Sud (HOJ) ; en réalité les quelques bons ensilages des Hauts de S^t Joseph regroupés pour raison d'effectifs avec ceux des Hauts de l'Ouest, tirent la modalité HOJ vers des ensilages meilleurs.

En tenant compte du plan 1-3 (annexe D - fig. D3 - p 70), qui différencie les saisons (HIV, AUT, ETE), la durée de conservation (CRT, LON) et l'apport de mélasse (PML, BML), la position de deux autres groupes peut être commentée. La forte contamination en spores butyriques (S4) est associée au temps nuageux à pluvieux (NUA), à l'automne (AUT) ; ce groupe se situe plutôt vers les ensilages moyens. A l'opposé, la faible contamination en spores butyriques (S20) est proche de la teneur en MAT faible (MAF) ; ce groupe se situe plutôt vers les bons ensilages. Les variables "apport de mélasse" et "durée de conservation", se projetant perpendiculairement à l'axe 1, ont peu d'influence sur la conservation.



légende des modalités de variables : annexe D - tableaux D1 à D4 - pp 68-70

Figure 16 : Plan 1-2 de l'analyse factorielle des correspondances multiples représentant les conditions de récolte et les notes synthétiques (inertie : axe 1 = 19 %, axe 2 = 10 %)

Les AFCM peuvent être résumées par un diagramme faisant intervenir les variables selon la qualité de leur représentation (annexe D - fig. D4 - p 71). Les qualités fermentaires (stabilité, conservation, ingestibilité, qualité de l'azote) sont bien représentées, alors que l'absence de spores butyriques l'est beaucoup moins. Parmi les conditions de récolte, la région, les espèces, la teneur en MS, les conditions de mécanisation et les conditions météorologiques sont bien représentées. Les autres variables interviennent peu sur la qualité des ensilages.

III.3.5. Conditions discriminantes de la qualité des ensilages

Les analyses factorielles discriminantes (AFD) des différentes notations synthétiques permettent de donner plus de sens aux liaisons figurées par l'ACP ou les AFCM. Hormis la note de contamination en spores, toutes les notes sont dépendantes des conditions et caractéristiques de chantier de façon similaire (tableau 36), ce qui est logique compte tenu de leur construction (§ III.2.3.). Cette analyse ayant recours à l'analyse de variance (Tomassone, 1988), seules les variables quantitatives ou considérées comme telles ont été retenues. Parmi les dix variables prises en compte dans l'AFD de la note de conservation (annexe D - fig. D6 - p 72) (tableau 36), quatre sont particulièrement importantes : teneur en MS et proportion d'espèces tempérées qui caractérisent les bons ensilages, mauvaises conditions de mécanisation et mauvaises conditions climatiques qui caractérisent les ensilages médiocres.

Au seuil $p < 0.05$, d'autres variables interviennent sur les notes (tableau 36). Pour les notes qualifiant la stabilité et l'ingestibilité, pratiquement toutes les variables sont discriminantes à ce seuil. Outre les critères principaux ($p < 0.001$), la durée de conservation discrimine la note de qualité de l'azote ; la dégradation de l'azote augmente avec la durée de conservation (Fujita, 1976).

La note de conservation, plus globale, fait apparaître, quant à elle, des relations plutôt logiques. En effet, les conditions climatiques étant difficilement prévisibles, l'amélioration de la qualité de conservation des ensilages passera par l'implantation de graminées tempérées, aptes à la fauche, sur des parcelles les plus mécanisables possible, en maîtrisant le stade de récolte et le rendement fourrager, l'objectif étant d'obtenir une teneur en MS élevée, gage de la bonne conservation (Corrot *et al.*, 1991 ; Andrieu *et al.*, 1992 ; Delacroix *et al.*, 1992 ; Corrot, 1993).

La teneur en MS et les conditions de mécanisation sont discriminantes de la note de contamination en spores. Les conditions énoncées au paragraphe précédent devraient donc permettre de diminuer la contamination en spores de *Clostridium*.

Tableau 36. : Conditions de récolte discriminantes des notes synthétiques (résultats des AFD)

notes synthétiques	inertie (%)		variables significativement discriminantes	
	axe 1	axe 2	au seuil $p < 0.001$	au seuil $p < 0.05$
conservation	85	12	MS, TEMP, MECA, METEO	+ RF, + STA
ingestibilité	84	14	MS, TEMP, MECA, METEO	+ RF, + STA, + DUR, + SUR, + MAT
qualité de l'azote	75	17	MS, TEMP, MECA, METEO	+ DUR, + RF,
stabilité (ΔpH)	94	6	MS, TEMP, RF, METEO, MAT, MECA,	+ SUR
absence de spores	85	9	MS	+ MECA

MS = teneur en MS ; TEMP = proportion d'espèces tempérées ; MECA = difficulté de mécanisation
METEO = conditions climatiques ; RF = rendement fourrager ; MAT = teneur en MAT ; SUR = surface
STA = stade ; DUR = durée de conservation

III.3.6. Différenciations régionales

La région apparaît comme une composante importante de différenciation des ensilages (cf. AFCM précédentes). Le positionnement des individus par des regroupements régionaux (annexe D - fig. D5 - p 71) montre bien ces différences par rapport à l'axe 1 traduisant les qualités fermentaires. En effet, la région Hauts de l'Ouest réunit beaucoup de mauvaises conditions expliquant les mauvaises conservations constatées : mécanisation difficile, kikuyu, stade de récolte tardif (stolons), rendements fourragers assez élevés. Des aménagements parcellaires y seraient nécessaires pour améliorer la récolte sous forme d'ensilage (Paillat *et al.*, 1994).

A l'opposé, la Plaine des Palmistes présente des conditions beaucoup mieux maîtrisées malgré les risques pluviométriques élevés. La Plaine des Cafres se caractérise par des situations diverses et contrastées, avec une marge de progrès importante simplement par la maîtrise du système fourrager (stade, rendement). La région Hauts du Sud, étudiée seulement en 1990 sur quelques chantiers, semble comparable à la Plaine des Palmistes. Les conditions rencontrées sont d'ailleurs assez similaires (fourrages, maîtrise du stade, aptitude à la mécanisation, pluviométrie).

III.3.7. Conclusion

Les analyses descriptives des ensilages en balles enrubannées réalisés chez les éleveurs montrent que la plupart des conditions de récolte sont influentes sur la conservation des ensilages. Cependant, elles interviennent pour la majorité au travers de la teneur en MS, qui demeure la principale des conditions de conservation, ce qui est en accord avec les références métropolitaines (Corrot *et al.*, 1991 ; Andrieu *et al.*, 1992 ; Delacroix *et al.*, 1992 ; Corrot, 1993). Les régions d'élevages se différencient nettement à travers ces conditions de récolte.

Il est assez surprenant que l'apport de sucres solubles, malgré des doses très variables d'un chantier à l'autre, et la durée de conservation n'apparaissent pas comme variables déterminantes. Cependant, la variable teneur en MS à la récolte opposée aux conditions météorologiques et la variable proportion d'espèces tempérées opposée à la difficulté de récolte (le kikuyu est difficile à récolter) sont vraisemblablement les deux principaux facteurs de conservation des balles enrubannées, ce que nous confirmerons avec les résultats présentés au chapitre suivant III.4..

L'amélioration de la conservation des ensilages en balles enrubannées est possible en choisissant des espèces aptes à la fauche, qui sèchent facilement (à cet égard, la fétuque peut présenter un intérêt). La maîtrise du stade de récolte et du rendement fourrager conditionne aussi l'obtention d'une teneur en MS élevée, d'autant plus que les conditions météorologiques ne sont pas contrôlables. L'aptitude à la mécanisation des parcelles et du fourrage est également une condition importante de la réussite de l'ensilage.

III.4. Etude de différents facteurs intervenant sur les fermentations

III.4.1. Introduction

Les analyses multidimensionnelles proposaient un aperçu général des conditions de conservation. Ce chapitre est consacré plus spécifiquement à l'influence de chacun des facteurs sur la qualité de conservation des ensilages en balles enrubannées. A partir des enquêtes (§ III.2.1.1.) et des essais (§ III.2.1.2., III.2.1.3. et III.2.1.4.), nous étudierons successivement l'influence de la teneur en MS, de l'espèce fourragère, de l'apport de sucres solubles et de conservateurs chimique ou biologique. L'aspect couleur du film étirable est également étudié.

III.4.2. Teneur en MS

III.4.2.1. Analyse des résultats des ensilages en balles enrubannées réalisés de 1990 à 1993

Facteurs explicatifs de la teneur en MS

Les analyses multidimensionnelles (§ III.3.) montrent l'importance de la teneur en MS sur la conservation des ensilages. Avec les données des ensilages réalisés de 1990 à 1993, une AFD (annexe D - fig. D7 - p 72) permet de déterminer les conditions de récolte qui influent sur la teneur en MS à la récolte. Le plan 1-2 représente 87 % de l'inertie, ses deux axes sont discriminants de la teneur en MS ($p < 0.001$). La plupart des conditions de récolte interviennent sur la teneur en MS, divisée en 5 classes d'effectifs comparables. Le classement par ordre de discrimination (test F) donne tout d'abord les conditions climatiques, puis le fourrage (stade, teneur en MAT, proportion d'espèces tempérées, rendement), et enfin les conditions de mécanisation et la surface.

Caractéristiques fermentaires et teneur en MS

Les caractéristiques fermentaires les mieux expliquées par la teneur en MS sont la proportion d'azote sous forme ammoniacale ($r = 0.50$) et la teneur en acide butyrique ($r = 0.46$) (annexe D - tableau D5 - p 73). Le pH présente un minimum de 4.2 pour une teneur en MS de 35 % (figure 17) ; la fonction est décroissante pour les ensilages humides et croissante pour les ensilages secs. Le ΔpH est lié à la teneur en MS par construction (§ III.2.3.) (Wieringa, 1962, *in* : Demarquilly, 1979). Globalement, les liaisons entre les caractéristiques fermentaires et la teneur en MS sont faibles par rapport aux résultats métropolitains (Corrot *et al.*, 1991 ; Delacroix *et al.*, 1992). Stabilité et note de conservation résument assez bien les caractéristiques des ensilages étudiés durant ces quatre années à La Réunion.

L'étude de la stabilité des ensilages montre des caractéristiques différentes des résultats métropolitains (Andrieu *et al.*, 1992 ; Delacroix *et al.*, 1992). Le pH ne suit pas la droite de stabilité : même pour des teneurs en MS élevées (> 35 %) le pH est bas ce qui suppose une fermentation lactique prédominante, favorisée vraisemblablement par l'apport élevé de sucres solubles sous forme de mélasse (environ 100 g kg⁻¹ MS en moyenne) (Tjandraatmadja, 1994ab). Les ensilages de fourrages tropicaux étudiés par Célanie (1982) avec fermentations acétique et butyrique dominantes sont également très différents de ceux de La Réunion, même pour le kikuyu. Près des 3/4 des ensilages (figure 17) ayant une teneur en MS inférieure à 27 % (42 % des ensilages réalisés) sont mal stabilisés, alors que 90 % des ensilages présentant une teneur supérieure à 27 % (58 % des ensilages) sont bien stabilisés. Au total, près des 2/3 des ensilages réalisés sont stables.

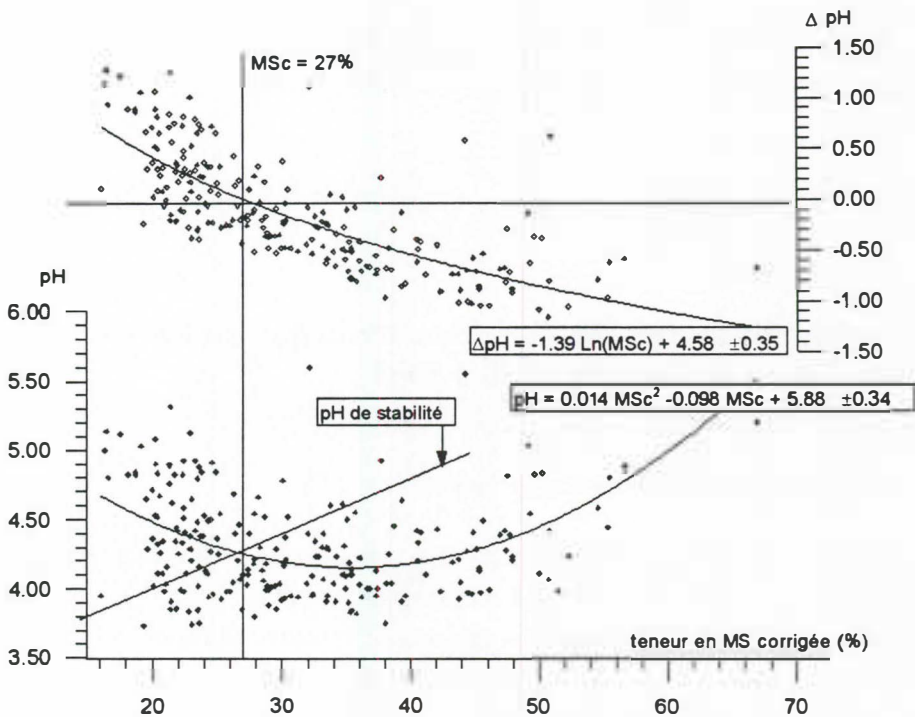


Figure 17. : Stabilité des ensilages en fonction de la teneur en MS pour les balles enrubannées réalisées de 1990 à 1993

Globalement, les 3/4 des ensilages ont une note de conservation supérieure à 10 (figure 18), c'est à dire que les caractéristiques fermentaires, prises dans leur ensemble, sont correctes. La proportion d'ensilages bien conservés (note > 10) est de 33, 68, 86, 91 et 98 % pour les classes de MS : < 22 %, de 22 à 27 %, de 27 à 33 %, de 33 à 40 % et > 40 %, respectivement. Les classes sont presque équivalentes avec 1/5 de l'effectif total (226 balles). En examinant la note d'ingestion, 82 et 95 % des ensilages ont une note satisfaisante pour les classes de teneur en MS inférieure et supérieure à 27 %, respectivement ; ceci est en liaison avec une faible production d'acide acétique. Par contre, la qualité de l'azote est moins satisfaisante pour les ensilages humides : la note est supérieure à 10 pour 60 et 92 % des ensilages pour les mêmes classes respectives. En effet, les teneurs en ammoniac sont assez élevées même pour des ensilages ressuyés. Par contre la teneur en azote soluble est souvent très faible.

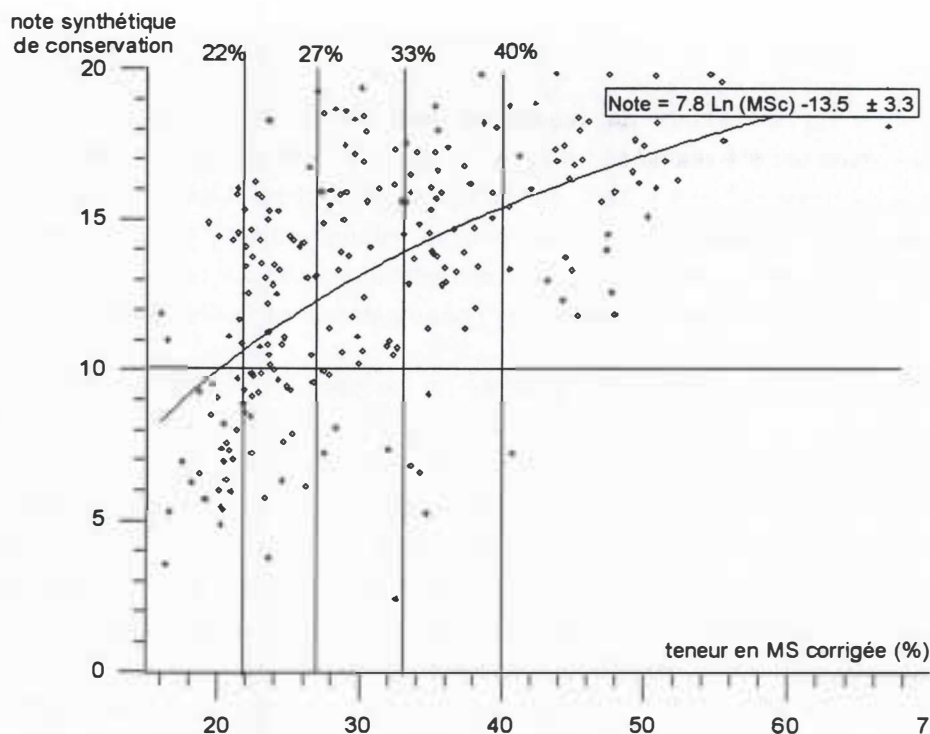


Figure 18 : Note synthétique de conservation des ensilages en fonction de la teneur en MS pour les balles enrubannées réalisées de 1990 à 1993

Les quantités d'ammoniac produites sont élevées : 1/4 des ensilages présente une proportion supérieure à 10 % (N total), malgré une teneur en MS supérieure à 34 %, et 58 % des ensilages présentent une proportion supérieure à 10 % (N total) pour une teneur en MS inférieure à 34 %. Certains ensilages présentent une proportion d'ammoniac proche de 50 % (N total). Environ les 3/4 des ensilages ont moins de 50 % d'azote soluble (% N total). Ces valeurs pour l'azote soluble sont plus faibles qu'en métropole, alors que les valeurs d'azote ammoniacal sont comparables. La dégradation des protéines par la protéolyse enzymatique semble faible. Par contre, la désamination des acides aminés, amines, et amides (Ohshima *et al.*, 1978), par des bactéries anaérobies facultatives (*Enterobacter*) ou certaines bactéries lactiques et par les bactéries butyriques protéolytiques (McDonald *et al.*, 1991), paraît privilégiée.

En moyenne, la production d'AGV est faible : près des 2/3 des ensilages présentent une teneur en acide acétique inférieure à 20 g kg⁻¹ MS ; ce qui semble comparable aux données métropolitaines (Delacroix *et al.*, 1992). Comme pour la métropole, les quantités d'acide butyrique produites sont élevées : au delà 34 % de MS, plus de 40 % des ensilages présentent encore une teneur supérieure à 5 g kg⁻¹ MS. En dessous de ce seuil de MS, 53 % des ensilages ont une teneur supérieure à 5 g kg⁻¹ MS, avec certains ensilages atteignant 45 g kg⁻¹ MS. Les teneurs en alcools sont généralement faibles (< 20 g kg⁻¹ MS), mais certains ensilages humides, notamment de kikuyu, présentent des teneurs très élevées, supérieures à 50 g kg⁻¹ MS.

La contamination en spores butyriques est très importante : 72 % des ensilages sont moyennement ou fortement contaminés. Au-dessus de 39 % de MS, 55 % des ensilages présentent plus de 1000 spores g⁻¹ MV ; en dessous de 39 % de MS, seulement 20 % des ensilages sont peu contaminés. Il faut atteindre 50 % de MS pour diminuer notablement les contaminations. Ces résultats confirment ceux de métropole (Delacroix *et al.*, 1992).

Analyse de la qualité de conservation par classes de MS

En retenant les seuils de teneur en MS définis précédemment, cinq classes d'effectifs comparables ont été réalisées : < 22 %, de 22 à 27 %, de 27 à 33 %, de 33 à 40 %, et > 40 %. La classe de teneur en MS < 22 % est différente des autres classes (annexe D - tableau D7 - p 74) : prédominance d'espèces tropicales (kikuyu), stade tardif (stolons), rendement en MS élevé (> 4 t ha⁻¹). Par ailleurs, les difficultés de mécanisation et la teneur en MAT diminuent et les conditions météorologiques s'améliorent avec l'augmentation de teneur en MS.

Le pH est bas pour des teneurs en MS moyennes (de 27 à 40 %) et le ΔpH décroît avec l'augmentation de la teneur en MS (tableau 37). Par rapport aux résultats enregistrés par l'Institut de l'Élevage (Corrot *et al.*, 1991 ; Delacroix *et al.*, 1992), les ensilages en balles enrubannées de La Réunion présentent des proportions d'azote soluble et des quantités d'acide butyrique plus faibles ; par contre, la proportion d'azote ammoniacal est comparable et les quantités d'acide acétique sont plus élevées. Le seuil minimum de 40 % de MS donné par Andrieu *et al.* (1992) et Delacroix *et al.* (1992) pourrait être abaissé à 33 %, voire 27 %, dans le cas des ensilages de La Réunion. En effet, les critères de conservation sont plutôt satisfaisants dès que la teneur en MS dépasse 27 %. L'apport de mélasse, visant à compenser la pauvreté en glucides solubles des fourrages, joue vraisemblablement en faveur d'une acidification lactique rapide et intense. La contamination en spores butyriques semble, quant à elle, assez comparable aux résultats métropolitains (tableau 37) : les ensilages sont encore fortement contaminés jusqu'à 40 % de MS ; toutefois, à partir de cette teneur, la plupart des ensilages ne présente que de 100 à 1000 spores g⁻¹ MV.

Tableau 37. : Caractéristiques fermentaires par classes de teneur en MS pour les ensilages réalisés de 1990 à 1993 (à partir des résultats de l'enquête)

caractéristiques fermentaires	moyenne globale	classes de teneur en MS					sign. F
		< 22%	22 à 27%	27 à 33%	33 à 40%	> 40%	
teneur en MS (%)	31.2	20.1 ^a	24.1 ^b	29.7 ^c	35.8 ^d	47.4 ^e	(***)
pH	4.31	4.49 ^d	4.32 ^{bc}	4.20 ^{ab}	4.15 ^a	4.41 ^{cd}	***
ΔpH	-0.14	0.49 ^e	0.16 ^d	-0.19 ^c	-0.49 ^b	-0.69 ^a	(***)
N soluble (% N total)	45.3	51.1 ^c	45.7 ^b	44.7 ^{ab}	43.5 ^{ab}	41.9 ^a	***
N-NH ₃ (% N total)	11.1	16.7 ^c	12.8 ^b	9.5 ^a	8.8 ^a	7.7 ^a	***
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	413	600 ^c	444 ^b	375 ^b	394 ^b	259 ^a	***
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	18.3	22.3 ^b	18.6 ^b	17.9 ^b	19.5 ^b	13.0 ^a	**
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	6.5	12.9 ^c	8.5 ^b	4.9 ^a	4.0 ^a	2.3 ^a	(***)
alcools (g kg ⁻¹ MS)	8.4	14.4 ^b	9.4 ^a	6.6 ^a	6.2 ^a	5.7 ^a	(***)
NPP (spores g ⁻¹ MV)	44297	83454 ^c	47897 ^b	48504 ^b	23052 ^a	25105 ^{ab}	***
log (NPP) (g ⁻¹ MV)	3.5	4.5 ^d	3.8 ^c	3.7 ^{bc}	3.1 ^{ab}	2.5 ^a	***

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil $p < 0.05$

() = hypothèse d'égalité des variances rejetée

Les notes de conservation, d'ingestibilité et de qualité de l'azote distinguent quatre types d'ensilages (tableau 38) : les mauvais ensilages pour MS < 22 %, les ensilages médiocres à moyens pour 22 % < MS < 27 %, les ensilages moyens à bons pour 27 % < MS < 40 %, et les ensilages excellents pour MS > 40 %. S'agissant de la note d'absence de spores (tableau 38), tous les ensilages sont fortement contaminés en dessous 33 % de MS ; au delà, il sont moyennement contaminés. La présence de terre sur le fourrage et les récoltes en conditions pluvieuses sont sans doute à l'origine de ces fortes contaminations. Actuellement, l'utilisation de la faucheuse à disques à la place de la récolteuse à fléaux améliore la qualité des parcelles et réduit, semble-t-il, la contamination en spores butyriques des balles enrubannées.

Tableau 38 : Notations synthétiques par classes de teneur en MS
pour les ensilages réalisés de 1990 à 1993 (à partir des résultats de l'enquête)

notations synthétiques	moyenne globale	classes de teneur en MS					sign. F
		< 22%	22 à 27%	27 à 33%	33 à 40%	> 40%	
conservation (/20)	13.1	9.2 ^a	11.9 ^b	13.8 ^c	14.5 ^c	16.4 ^d	***
ingestibilité (/20)	14.5	11.5 ^a	13.8 ^b	15.1 ^c	15.2 ^c	17.0 ^d	***
qualité de l'azote (/20)	13.6	9.6 ^a	12.1 ^b	14.8 ^c	15.3 ^{cd}	16.4 ^d	***
absence spores (/20)	7.6	3.1 ^a	6.3 ^b	6.7 ^b	9.2 ^{bc}	12.1 ^c	***

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05

() = hypothèse d'égalité des variances rejetée

III.4.2.2. Influence de la teneur en MS sur la conservation d'un dactyle récolté à la Plaine des Palmistes en décembre 1993

Cet essai (§ III.2.1.2.) a pour but de cerner plus précisément l'influence de la teneur en MS, en affinant les résultats obtenus sur l'ensemble des ensilages (§ III.4.2.1.). L'analyse des corrélations montre des liaisons significatives, toutes négatives, entre la teneur en MS et les caractéristiques de conservation (annexe D - tableau D6 - p 73). Les produits de fermentations diminuent avec l'augmentation de la teneur en MS (figure 19) (Andrieu *et al.*, 1992).

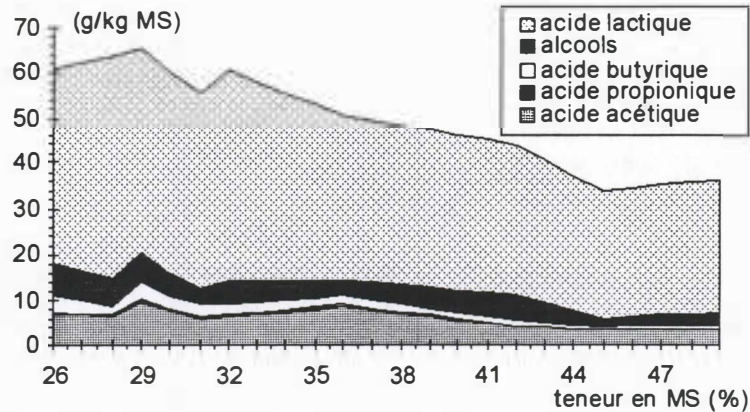


Figure 19. : Evolution des teneurs en AGV, alcools et acide lactique en fonction de la teneur en MS, dans les ensilages de dactyle préfané, récolté au stade épiaison, à la Plaine des Palmistes

Les fermentations de deux balles enrubannées (§ III.2.1.2.) ont été suivies au laboratoire (essai F9 - § III.2.1.4.) : la première balle (balle humide à 30 % de MS) a été réalisée peu de temps après la fauche et la seconde (balle sèche à 48 % de MS) en fin de séchage. La quantité totale de glucides solubles était suffisante ($100\text{ g kg}^{-1}\text{ MS}$) grâce à l'apport de mélasse ($\text{SS} = 40\text{ g kg}^{-1}\text{ MS}$). A partir d'un fourrage récolté à $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, les températures à 20 et 50 cm dans la balle humide se sont élevées à $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (température ambiante). Pour la balle sèche, les températures ont atteint $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ et sont redescendues à $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ après plusieurs jours. La différence d'humidité des balles explique la différence d'accroissement de température : l'énergie absorbée dans l'élévation de température a été la même pour les deux balles (environ 6000 kJ).

Pendant la fermentation, en raison d'une activité bactérienne plus importante, les pertes de poids sont plus élevées et les produits de fermentation (N-NH_3 , N soluble, AGV, acide lactique, alcools) en quantité plus importante dans la balle humide (annexe D - tableau D8 - p 74). L'acidification (figure 20) est plus intense pour la balle humide (pente plus forte), avec une production d'acide lactique supérieure : 55 contre $34\text{ g kg}^{-1}\text{ MS}$ pour la balle sèche. Mais le pH de stabilité est atteint moins rapidement : 30 contre 12 h pour la balle sèche. L'orientation des fermentations est lactique, avec peu d'AGV. Pour les deux balles, la conservation est excellente avec des notes supérieures à $16 / 20$. La contamination en spores butyriques est faible.

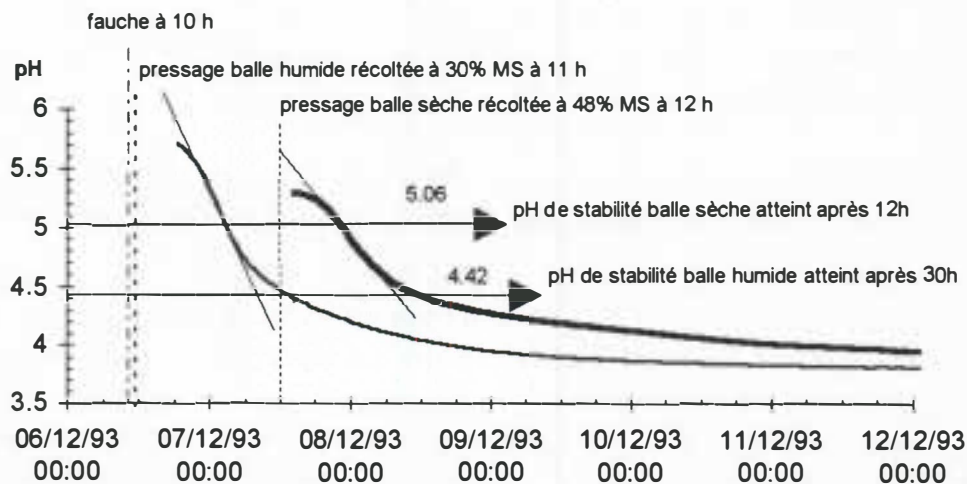


Figure 20. : Influence de la teneur en MS sur l'acidification de l'ensilage, pour du dactyle récolté au stade épiaison avec un apport de sucres solubles correspondant à $40\text{ g kg}^{-1}\text{ MS}$, à la Plaine des Palmistes en décembre 1993

Remarque sur la méthodologie

L'appréciation des quantités de gaz dégagées à partir du suivi des pressions et de la mesure d'étanchéité après fermentations est incertaine, car les ruptures d'étanchéité liées à l'intensité de la respiration dans les premières heures sont fréquentes et non quantifiables par cette méthode. Les enregistrements de températures et de pH sont cependant utilisables, mais il faut tenir compte du fait que les sondes sont placées à des endroits très précis de la balle. La détermination des caractéristiques fermentaires sur trois échantillons prélevés à la fin du suivi permet de valider les enregistrements, notamment pour le pH.

III.4.3. Espèce fourragère

Les analyses multidimensionnelles (§ III.3.) montrant l'importance de la proportion d'espèces tempérées dans la conservation des ensilages, les données enregistrées de 1990 à 1993 (§ III.2.1.1.) permettent de comparer les caractéristiques fermentaires moyennes des principales espèces ensilées à La Réunion (ray-grass, dactyle, fétuque et kikuyu), dont les conditions de récolte sont présentées en annexe D (p 75). Les ensilages humides ou faiblement ressuyés (MS < 27 %) ont été distingués des ensilages préfanés ou mi-fanés (MS ≥ 27%).

Les ensilages humides (MS < 27 %) sont mal conservés (tableau 39) avec des fermentations de type butyrique et une forte activité de la flore protéolytique. Cependant, les graminées tempérées sont à distinguer du kikuyu sur plusieurs caractéristiques : pH plus faible et meilleure stabilité, moins d'azote soluble et ammoniacal et moins d'alcools. Les quantités importantes d'alcools produites avec le kikuyu résultent peut-être du développement de levures (10² UFC g⁻¹ sur du kikuyu récolté en août 1994, alors qu'aucune levure n'est comptée sur du ray-grass en même lieu et date), notamment sur les stolons plus riches en glucides solubles (Gilibert, 1981) (30 % de plus que dans les feuilles d'après une mesure faite en août 1994). La production d'alcools peut être le fait également de bactéries lactiques hétérofermentaires (McDonald *et al.*, 1991). Les ensilages préfanés et mi-fanés sont meilleurs, bien que les teneurs en azote ammoniacal du kikuyu soient encore un peu élevées. La plus faible acidification ainsi qu'une production d'acide acétique et d'alcools plus importante semble également caractériser les ensilages de kikuyu, supposant peut-être une fermentation lactique hétérofermentaire.

Tableau 39 : Caractéristiques fermentaires des ensilages en balles enrubannées (1990 à 1993), pour différentes espèces fourragères, en distinguant deux classes de teneur en MS

caractéristiques des fermentations	teneur en MS < 27 %				teneur en MS ≥ 27 %			
	RG brome	dactyle fétuque	kikuyu	sign. F	RG brome	dactyle fétuque	kikuyu	sign. F
teneur en MS (%)	23.5	22.9	21.9	ns	38.7	37.5	36.0	ns
pH	4.32	4.30	4.48	ns	4.31	4.21	4.29	ns
ΔpH	0.18 ^a	0.18 ^a	0.40 ^b	*	-0.44	-0.49	-0.35	ns
N soluble (% N total)	42.7 ^a	44.5 ^a	52.5 ^b	***	43.2	43.0	45.6	ns
N-NH3 (% N total)	9.9 ^a	13.3 ^a	17.3 ^b	***	8.7 ^{ab}	7.7 ^a	10.5 ^b	(*)
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	427	504	511	ns	369 ^{ab}	284 ^a	483 ^b	(**)
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	17.6	20.8	19.3	ns	17.6 ^a	13.8 ^a	24.3 ^b	(***)
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	7.8	10.3	10.5	ns	4.6	3.2	4.9	ns
alcools (g kg ⁻¹ MS)	6.0 ^a	5.9 ^a	18.0 ^b	(***)	5.4 ^a	6.3 ^{ab}	7.9 ^b	(*)
NPP (spores g ⁻¹ MV)	44955	55750	77545	ns	30059	35224	35092	ns
log (NPP)	4.0	3.6	4.4	ns	3.5	3.1	3.2	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05

() = hypothèse d'égalité des variances rejetée ; RG = ray grass

III.4.4. Apport de sucres solubles

Dans les analyses multidimensionnelles (§ III.3.), l'apport de sucres solubles n'est pas apparu être un facteur discriminant. Cependant, compte tenu des conservations médiocres des ensilages humides de dactyle mais surtout de kikuyu (§ III.4.3.), fourrages pauvres en glucides solubles, des essais d'addition de sucres solubles et de différents conservateurs ont été conduits avec ces deux espèces, à des teneurs en MS faible et moyenne.

III.4.4.1. Apport de sucres solubles sur un dactyle

A la Plaine des Palmistes, sur un dactyle riche en glucides solubles (65 g kg^{-1} MS) compte tenu de la période de récolte (décembre 1993) (§ III.2.1.2.), l'analyse des corrélations ne donne aucune liaison entre le taux d'apport de sucres solubles ($0 - 20 - 40 \text{ g kg}^{-1}$ MS) et les caractéristiques fermentaires. La comparaison de celles-ci pour deux ensilages, avec et sans apport de mélasse (annexe D - p 76), n'est pas significative ; on constate cependant plus d'acide lactique et moins de butyrique pour l'ensilage peu ressuyé ($\text{MS} < 30 \%$) ayant reçu de la mélasse. Les deux ensilages, avec ou sans mélasse, sont bons : notes de conservation, d'ingestibilité et de qualité de l'azote quasi identiques. Les teneurs en glucides solubles et en MS élevées du fourrage et la faible différence entre les niveaux d'apport de mélasse expliquent ces résultats de conservation non discriminants.

III.4.4.2. Suivis de fermentations (essais F3 et F4 définis § III.2.1.4. - p 109)

Dactyle sans préfanage

Cet essai a pour objectif de cerner l'intérêt d'apporter une forte quantité de mélasse pour améliorer la conservation des ensilages en balles enrubannées très humides. Du dactyle a été récolté au stade feuillu ($\text{MAT} = 125 \text{ g kg}^{-1}$ MS), avec une teneur en glucides solubles estimée à 20 g kg^{-1} MS, compte tenu de la période : en février à la Plaine des Cafres (§ I.3.3.1.). Les fermentations de deux balles, l'une avec mélasse (apport de sucres solubles de 15% MS) et l'autre sans, ont été suivies. Un prélèvement a été réalisé après un mois de conservation.

L'acidification de la balle sans mélasse est rapide (figure 21) : baisse du pH à 4.5 en 16 heures, mais insuffisante par manque de glucides solubles. Après une phase de décroissance lente, la flore butyrique prend le relais (après seulement 3 jours) en faisant remonter le pH. Malgré les problèmes de positionnement de la sonde de pH de la balle avec mélasse, il est possible de noter que le pH de stabilité est atteint, mais seulement au bout de 4 jours. Pendant ce temps, la germination des spores butyriques, favorisée par la température de 27°C (Gouet, 1979), provoque la remontée du pH (à partir du 5^{ème} jour). L'humidité du fourrage, les brins longs, la flore bactérienne présente sur le fourrage et les températures élevées, ont pu favoriser la flore lactique hétérofermentaire peu acidifiante. Les différences de pression enregistrées dans les deux balles ($\Delta P = 1.4 \text{ mbar}$) font apparaître une respiration intense (dégagement de CO_2) dans les 10 premières heures. Du fait d'une grande quantité d'eau dans le fourrage (700 à 800 l par balle), les températures ont augmenté lentement de 22 à 27.5°C durant 15 jours.

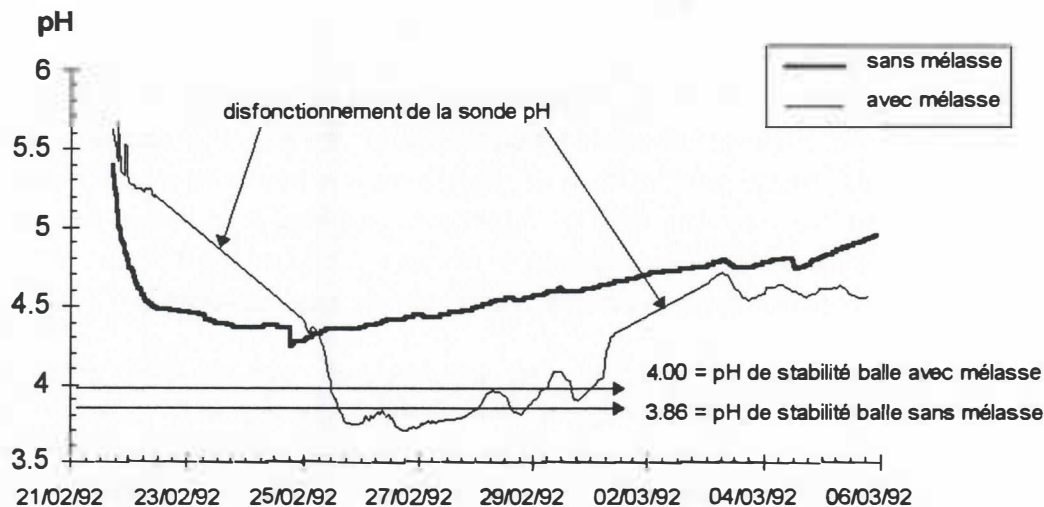


Figure 21 : Influence de l'apport de mélasse sur l'acidification d'un ensilage de dactyle, récolté au stade feuillu avec une teneur en MS de 15 %, à la Plaine des Cafres en février 1992

Les qualités de conservation de ces deux ensilages sont mauvaises (tableau 40). Malgré un faible dénombrement de spores, l'activité de la flore butyrique est à l'origine de cette dégradation : quantités très importantes d'ammoniac et d'acide butyrique. Bien que le pH soit inférieur grâce à une plus grande quantité d'acide lactique, l'apport de sucres solubles ne permet pas de limiter suffisamment cette dégradation : beaucoup d'acides acétique et butyrique sont produits. Par ailleurs, cet apport semble avoir favorisé la fermentation lactique hétérofermentaire, d'où la présence de quatre fois plus d'alcools.

Tableau 40 : Influence de l'apport de sucres solubles (environ 150 g kg⁻¹ MS) sur les caractéristiques fermentaires d'un ensilage de dactyle, récolté au stade feuillu avec une teneur en MS de 15 %, à la Plaine des Cafres en février 1992

caractéristiques de l'ensilage	sans mélasse	avec mélasse	caractéristiques de l'ensilage	sans mélasse	avec mélasse
teneur en MS (%)	15.2	18.7	AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	1152	912
pH	5.00	4.36	C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	45.0	36.0
ΔpH	1.14	0.36	C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	21.0	18.0
N soluble (% N total)	59.0	54.0	alcools (g kg ⁻¹ MS)	3.0	12.0
N-NH3 (% N total)	44.0	14.5	NPP (spores g ⁻¹ MV)	23	29

Pour résumer, dans le cas d'un fourrage pauvre en glucides solubles (dactyle, kikuyu ...), récolté très humide et en brins longs, un apport abondant de mélasse améliore les fermentations, mais ne permet pas d'obtenir un ensilage suffisamment bien conservé et stable. Ce constat explique en partie la mauvaise conservation des ensilages récoltés en coupe directe avec des ensileuses à fléaux ou double-coupe (Brunschwig, 1988 ; Hassoun, à paraître). L'ensilage en balles enrubannées nécessite un préfanage suffisant (§ III.4.2.).

Mélange préfané de dactyle, ray-grass hybride (RGH) et kikuyu

Cet essai a pour objectif de cerner l'influence d'un apport de mélasse sur la conservation des ensilages préfanés en balles enrubannées. Un mélange de dactyle - RGH - kikuyu a été ensilé au stade feuillu (MAT = 165 g kg⁻¹ MS), avec une teneur en glucides solubles estimée à 30 ou 40 g kg⁻¹ MS, compte tenu de la période : en avril à la Plaine des Cafres (§ 1.3.3.1.). Deux balles, l'une avec mélasse (apport de sucres solubles de 6 à 8 % MS) et l'autre sans, ont été suivies en fermentation, puis prélevées après un mois de conservation.

Au cours du processus fermentaire, les températures dans les deux balles sont restées identiques : récolte à 22 °C, puis montée de la température jusqu'à 28.5 °C après 7 jours et 30.5 °C après 10 jours pour 20 et 50 cm de profondeur dans la balle, respectivement ; elles se sont ensuite stabilisées à 27 °C (température ambiante). Ces variations thermiques résultant de la phase de respiration, correspondent à une faible dépense énergétique. Les irrégularités dans la baisse de pH de la balle avec mélasse résultent de difficultés de contact entre la sonde et le fourrage assez sec (figure 22) ; la tendance de la courbe reste cependant interprétable. La balle avec mélasse a atteint le pH de stabilité au bout de 60 heures, alors que la balle sans mélasse n'a été acidifiée que très tardivement (pH = 4.41 après 4 semaines). Les faibles débits gazeux, 0.12 et 0.04 l min⁻¹ pour les balles sans et avec mélasse, respectivement, sont en liaison avec l'action limitée de la respiration.

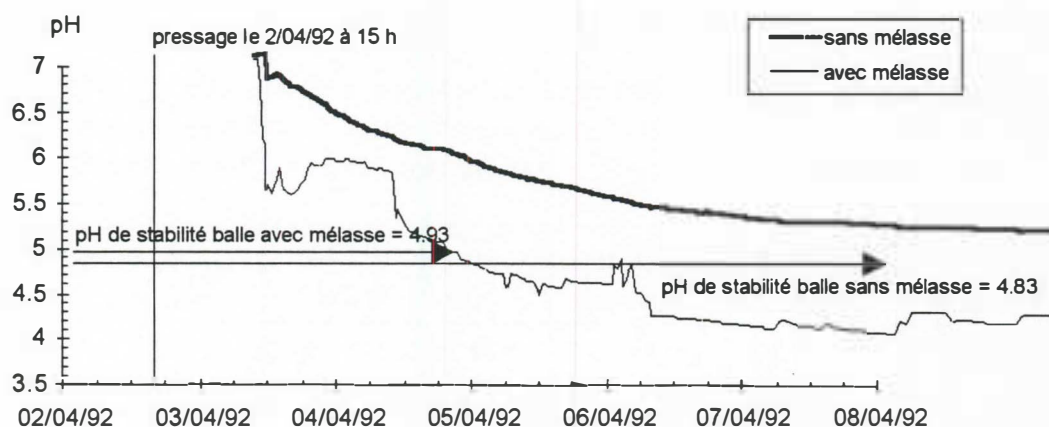


Figure 22 : Influence de l'apport de mélasse sur l'acidification d'un ensilage d'un mélange de dactyle - RGH - kikuyu, récolté au stade feuillu avec une teneur en MS de 40 %, à la Plaine des Cafres en avril 1992

Durant cette acidification suffisante mais trop lente et malgré une teneur en MS élevée et une faible contamination en spores, la flore butyrique s'est développée dans les deux cas comme en témoignent les quantités élevées d'ammoniac et d'acide butyrique (tableau 41). La mélasse a cependant amélioré la qualité de conservation en diminuant les produits de fermentation. La production d'alcools à partir des glucides de la mélasse est également perceptible dans cette comparaison : activité de bactéries lactiques hétérofermentaires ou de levures au début de la fermentation venant diminuer l'efficacité de la flore lactique homofermentaire.

Tableau 41 : Influence de l'apport de sucres solubles (60 à 80 g kg⁻¹ MS) sur les caractéristiques fermentaires d'un ensilage de dactyle - RGH - kikuyu en mélange, récolté au stade feuillu avec une teneur en MS de 40 %, à la Plaine des Cafres en avril 1992

caractéristiques de l'ensilage	sans mélasse	avec mélasse	caractéristiques de l'ensilage	sans mélasse	avec mélasse
teneur en MS (%)	40.8	43.2	AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	566	332
pH	4.41	4.19	C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	24.8	13.7
ΔpH	-0.42	-0.74	C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	7.6	5.5
N soluble (% N total)	51.2	40.4	alcools (g kg ⁻¹ MS)	4.7	12.0
N-NH ₃ (% N total)	22.0	10.9	NPP (spores g ⁻¹ MV)	16	9

Comme pour les balles humides, l'apport de mélasse améliore très nettement toutes les caractéristiques de conservation. Dans le cas d'un mélange de graminées avec du kikuyu, l'ensilage préfané à 40 % de MS avec mélasse est plus stable, mais présente néanmoins des quantités d'ammoniac et d'acide butyrique non négligeables. Il serait nécessaire d'atteindre des teneurs en MS supérieures pour garantir plus sûrement la protection des matières azotées.

III.4.4.3. Additions de différentes doses de mélasse sur des dactyles et kikuyus récoltés humides

Parmi les traitements réalisés dans l'essai de conservateurs (§ III.2.1.3.), l'apport de mélasse a permis d'obtenir trois additions différentes de sucres solubles : 0, 50 et 70 g kg⁻¹ MS (D2, K1 et K2) et 0, 70 et 120 g kg⁻¹ MS pour le dactyle D1. Les prélèvements ayant eu lieu seulement après 4 semaines de fermentation, il est possible que la flore butyrique ne se soit pas manifestée complètement, bien que les suivis fermentaires montrent que l'activité butyrique débute rapidement (quelques jours après la récolte). Les ensilages n'ayant pas atteint le pH de stabilité sont donc susceptibles de se dégrader ultérieurement.

Dactyles sans ressuyage et ressuyé

Ces résultats (tableau 42) montrent à nouveau l'influence de la teneur en MS (§ III.4.2.) sur les fermentations. Le dactyle récolté à 30 % de MS présente des quantités de N-NH₃, AGV, C₂ et C₄, inférieures à celles du dactyle récolté à 21 % de MS. La proportion d'azote soluble, plus élevée pour le dactyle plus sec, peut être expliquée par un fourrage plus jeune avec une plus forte teneur en MAT : 119 et 158 g kg⁻¹ MS pour D1 et D2, respectivement. Pour le dactyle humide, la mélasse améliore les caractéristiques fermentaires avec vraisemblablement davantage d'acide lactique (pH plus élevé), moins d'AGV, C₂ et C₄, un peu moins de N-NH₃ (Tjandraatmadja, 1993). Les quantités d'alcools semblent plutôt suivre les teneurs en glucides solubles totaux : mélasse + fourrage. Pour le dactyle plus sec (30 % MS), l'apport de sucres solubles améliore également les fermentations (pH), mais de façon moins nette, compte tenu de la teneur en glucides solubles plus élevée du fourrage vert. L'influence de la mélasse sur la production d'acide acétique et d'alcools n'est pas perceptible.

Tableau 42 : Influence de l'apport de sucres solubles sur des dactyles (D1 et D2), récoltés au stade feuillu, à deux teneurs en MS différentes, à la Plaine des Cafres, en mars et juin 1993

teneur en MS (%)	essai D1 = 21 %				essai D2 = 30 %			
GS (g kg ⁻¹ MS)	0 -30	70 -100	120 -150	sign. F	0 -60	50 -110	70 -130	sign. F
teneur en MS (%)	21.5 ^a	22.8 ^b	22.9 ^b	*	32.7	28.0	30.7	ns
pH	4.14 ^b	3.80 ^a	3.79 ^a	***	4.48 ^b	4.09 ^a	3.90 ^a	(**)
ΔpH	0.11 ^b	-0.28 ^a	-0.30 ^a	***	0.01	-0.20	-0.50	ns
N soluble (% N total)	45.5	43.5	44.5	ns	51.8	48.1	50.4	ns
N-NH ₃ (% N total)	14.7	12.2	13.0	ns	9.0	8.3	7.8	ns
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	380 ^b	324 ^{ab}	236 ^a	*	88	116	88	ns
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	21.1	18.4	13.8	ns	5.0	6.5	5.1	ns
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	1.5 ^b	1.0 ^{ab}	0.2 ^a	(**)	0.2 ^a	0.4 ^b	0.3 ^a	*
alcools (g kg ⁻¹ MS)	2.5 ^a	4.0 ^b	4.3 ^b	***	6.9	8.4	5.6	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05

() hypothèse d'égalité des variances rejetée ; GS = glucides solubles

en caractères gras : sucres solubles apportés par la mélasse

en caractères maigres et italiques : glucides solubles totaux, mélasse + fourrage

Remarques

Pour les ensilages humides de dactyle (tableau 42), les quantités d'ammoniac sont élevées, sans qu'on constate pour autant de fermentation butyrique importante. Cette production pourrait provenir de l'activité de bactéries anaérobies facultatives du genre *Enterobacter* (Henderson, 1984, 1987, in : McDonald *et al.*, 1991), ou de certaines souches de bactéries lactiques (Heron *et al.*, 1986, in : McDonald *et al.*, 1991), bien que normalement ces espèces ne soient pas protéolytiques. Les enzymes de la plante, bien que s'attaquant peu aux acides aminés (Heron *et al.*, 1986, in : McDonald *et al.*, 1991), pourraient également jouer un rôle dans la phase initiale de l'ensilage (Brady, 1960 ; Gouet *et al.*, 1964, in : McDonald *et al.*, 1991), notamment dans les conditions de températures élevées (20 à 25 °C) des fourrages ensilés à La Réunion.

La composition en différentes fractions azotées du fourrage pourrait avoir également une incidence. En effet, la fraction soluble de l'azote est élevée (> 30 % de N total) dans les fourrages verts récoltés dans les Hauts de l'île, notamment en période estivale (Brunschwig, résultats non publiés) ; cette fraction soluble, composée de petits peptides, d'acides aminés, d'amines, d'amides est facilement dégradable (McDonald *et al.*, 1991). Du fait de cette disponibilité en éléments azotés solubles, il y aurait une dégradation préférentielle en ammoniac et l'action sur les protéines serait plus limitée, d'où les teneurs en azote soluble faibles constatées dans les ensilages même très dégradés.

La structure en brins entiers du fourrage peut également être un facteur d'orientation des fermentations (glucides peu disponibles pour la flore lactique homofermentaire).

Kikuyus sans ressuyage et faiblement ressuyé

Pour les deux ensilages de kikuyu humide (tableau 43), les conservations sont médiocres, avec peu d'acide lactique produit (pH élevés). La production d'alcools, très importante, peut suggérer une fermentation initiale lactique hétérofermentaire, puis butyrique avec fabrication d'ammoniac et d'acide butyrique. Ce profil fermentaire correspond assez bien aux données sur fourrages tropicaux (Catchpoole, 1965, 1970, 1971, Aguilera, 1975, *in* : Célanie, 1982). L'apport de mélasse semble améliorer un peu la conservation, notamment en augmentant la teneur en MS et en diminuant la production d'acide butyrique. Mais cet apport, qui permet tout juste d'atteindre 100 g kg⁻¹ MS de glucides solubles, n'est pas suffisant pour initier une fermentation lactique performante du kikuyu récolté à des teneurs en MS faibles.

Les stolons de kikuyu (K1) sont plus riches en glucides solubles (Gilibert, 1981) (§ III.4.3.) ; n'ayant pas été inclus dans le prélèvement pour l'analyse des glucides solubles, il est possible que la teneur de 25 g kg⁻¹ MS ait été sous-estimée. Les levures présentes sur ce type de fourrage (10² UFC g⁻¹ de levures ont été comptées sur du kikuyu en août 1994 à la Plaine des Cafres) ont pu transformer les glucides solubles en alcools (Célanie, 1982). Cependant, cet auteur mentionne davantage de levures : 10⁷ à 10⁸ UFC g⁻¹ sur canne à sucre et 10 à 10² UFC g⁻¹ sur sorgho. Cette activité des levures se fait au détriment de l'acidification lactique, et l'apport de mélasse ne fait que renforcer cette action. Pour le kikuyu K1 additionné d'une forte dose de mélasse, la fermentation lactique plus intense constatée (pH = 4.24) a réduit les quantités d'acides acétique et butyrique, mais pas les quantités d'alcools.

Tableau 43 : Influence de l'apport de sucres solubles sur des kikuyus récoltés humides, au stade stolons (K1) et au stade feuillu (K2), à la Plaine des Cafres, en avril et mai 1993

teneur en MS (%)	essai K1 = 20 %				essai K2 = 22 %			
GS (g kg ⁻¹ MS)	0 -20	50 -70	70 -90	sign. F	0 -30	50 -80	70 -100	sign. F
teneur en MS (%)	20.2	21.0	21.4	ns	21.4 ^a	23.7 ^b	23.8 ^b	***
pH	4.77 ^c	4.53 ^b	4.24 ^a	***	5.10	4.66	4.66	ns
ΔpH	0.83 ^c	0.54 ^b	0.25 ^a	***	1.09 ^b	0.57 ^a	0.55 ^a	*
N soluble (% N total)	54.7 ^a	53.6 ^a	64.2 ^b	*	58.8	57.7	57.6	ns
N-NH ₃ (% N total)	20.9 ^b	16.9 ^a	21.3 ^b	**	17.3	17.1	16.1	ns
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	610 ^b	468 ^{ab}	348 ^a	*	346	345	328	ns
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	22.3 ^b	17.0 ^{ab}	13.9 ^a	*	17.6	14.5	16.5	ns
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	13.1 ^b	11.5 ^{ab}	7.3 ^a	*	3.1	5.5	2.8	ns
alcools (g kg ⁻¹ MS)	48.6	41.7	54.1	ns	26.3	36.3	25.5	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil $p < 0.05$

() hypothèse d'égalité des variances rejetée ; GS = glucides solubles

en caractères gras : sucres solubles apportés par la mélasse

en caractères maigres et italiques : glucides solubles totaux, mélasse + fourrage

III.4.5. Apport de conservateurs

En raison de conditions climatiques difficiles, les ensilages en balles enrubannées présentent souvent une teneur en MS trop faible (31.2 % en moyenne sur 4 ans). Ces ensilages peu préfanés ne se conservent pas très bien (§ III.4.2.), même avec un apport de glucides solubles important (§ III.4.4.). Pour les améliorer, deux types de conservateurs ont été testés : un sel d'acide formique (TFA) et un produit biologique (Caylasil®) (§ III.2.1.3. - p 106).

III.4.5.1. Sel d'acide formique, inhibiteur de la fermentation

Le tetraformiate d'ammonium (TFA) a été employé à deux doses différentes, avec apport de sucres solubles pour la dose faible et sans apport pour la dose forte. Le témoin (sans TFA) est composé des autres traitements de l'essai : T1, T2, T3 et T6 (§ III.2.1.3. - p 106).

Dactyles sans ressuyage et ressuyé

L'addition de TFA inhibe la fermentation lactique (pH élevé) (tableau 44). Même à la dose forte de 5 l t⁻¹ MV (dose recommandée = 3.5 l t⁻¹ MV), l'acidification est insuffisante pour stabiliser l'ensilage. Celle-ci paraît plus forte avec D1 (par rapport à D2) ; la dissociation du TFA, nécessitant la présence d'eau (§ III.2.1.3.), serait plus complète dans le fourrage humide.

Tableau 44 : Influence de l'incorporation de tetraformiate d'ammonium sur des dactyles, récoltés au stade feuillu, à deux teneurs en MS, à la Plaine des Cafres, en mars et juin 1993

teneur en MS (%)	essai D1 = 21 %				essai D2 = 30 %			
GS (g kg ⁻¹ MS)	80 -110	70 -100	0 -30	sign.	50 -110	50 -110	0 -60	sign.
TFA (l t ⁻¹ MV)	0	2.6	4.8	F	0	3	5.8	F
teneur en MS (%)	22.6	21.9	22.0	ns	31.8	27.4	30.1	ns
pH	3.84 ^a	3.85 ^a	4.25 ^b	(***)	4.02 ^a	4.14 ^a	4.78 ^b	***
ΔpH	-0.24 ^a	-0.20 ^a	0.20 ^b	***	-0.42 ^a	-0.13 ^b	0.40 ^c	***
N soluble (% N total)	45.5	43.5	41.4	ns	51.5	48.0	48.7	ns
N-NH ₃ (% N total)	12.6 ^a	13.6 ^{ab}	16.1 ^b	*	8.4	8.2	8.8	ns
N-NH ₃ cor. (% N total)	12.6	10.5	10.7	ns	8.4 ^b	6.3 ^a	5.4 ^a	**
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	297	254	423	ns	105	106	66	ns
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	17.3	13.2	23.1	ns	6.0	5.9	3.8	ns
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	0.4 ^a	2.1 ^b	2.0 ^b	***	0.2	0.4	0.1	ns
alcools (g kg ⁻¹ MS)	4.1 ^b	3.3 ^b	1.8 ^a	***	6.1 ^a	9.7 ^b	7.4 ^{ab}	**

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001
les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05
() hypothèse d'égalité des variances rejetée ; GS = glucides solubles
N-NH₃ cor. = N-NH₃ corrigé par l'apport maximal d'ammoniac provenant de la décomposition du tetraformiate d'ammonium
en caractères gras : sucres solubles apportés par la mélasse
en caractères maigres et italiques : glucides solubles totaux, mélasse + fourrage

En considérant une dissociation complète du TFA, la quantité d'ammoniac provenant des fermentations serait inférieure au témoin ($N-NH_3$ corrigé, tableau 44). Mais la partition entre les deux sources d'ammoniac n'est pas aisée, car on ne connaît pas le degré de dissociation du TFA. La proportion d'ammoniac provenant des fermentations se situerait plutôt entre les deux valeurs présentées. Il y a donc peu de différences liées à l'apport de TFA.

A La Réunion, pour du dactyle récolté en balles enrubannées (brins longs), un sel d'acide formique tel que le tétraformiate d'ammonium semble se décomposer trop lentement pour agir significativement sur la flore de dégradation des ensilages et son action inhibitrice sur la flore lactique s'avère néfaste. De plus, la libération d'ammoniac qui accompagne le TFA est préjudiciable à la qualité des ensilages d'herbe qui en contiennent déjà trop.

Kikuyus sans ressuyage et faiblement ressuyé

Ces deux ensilages de kikuyu sont de qualité médiocre et instables (tableau 45), avec peu d'acide lactique produit (pH élevé). Bien que les différences ne soient pas significatives, l'incorporation de TFA semble inhiber la flore lactique. Toutefois, dans le cas du kikuyu feuillu (K2), le TFA diminue les quantités d'AGV, d'acides acétique et butyrique, et d'alcools (différences non significatives pour ces deux dernières caractéristiques), ainsi que la proportion d'ammoniac en tenant compte d'une dissociation complète du TFA. Compte tenu de l'instabilité de ces ensilages, les fermentations butyriques peuvent se prolonger.

Tableau 45 : Influence de l'incorporation de tétraformiate d'ammonium sur des kikuyus récoltés humides, au stade stolons et au stade feuillu, à la Plaine des Cafres, en avril et mai 1993

teneur en MS (%)	essai K1 = 20 % (stolons)				essai K2 = 22 % (feuillu)			
GS ($g\ kg^{-1}\ MS$)	50 -70	50 -70	0 -20	sign.	40 -70	50 -80	0 -30	sign.
TFA ($l\ t^{-1}\ MV$)	0	1.9	3.9	F	0	3.2	4.7	F
teneur en MS (%)	21.4 ^b	19.6 ^a	20.0 ^{ab}	(*)	23.1 ^b	23.8 ^b	21.3 ^a	*
pH	4.44	4.65	4.71	ns	4.78	4.84	4.89	ns
ΔpH	0.45	0.73	0.76	ns	0.70	0.74	0.87	ns
N soluble (% N total)	59.1	52.1	55.2	ns	57.7	58.6	58.9	ns
$N-NH_3$ (% N total)	20.1	17.3	20.3	ns	17.1	17.3	15.0	ns
$N-NH_3$ cor. (% N total)	20.1 ^b	13.6 ^a	12.8 ^a	***	17.1 ^b	14.4 ^{ab}	11.1 ^a	**
AGV ($mmol\ kg^{-1}\ MS$)	469	557	443	ns	380 ^b	282 ^{ab}	215 ^a	*
C_2 ($g\ kg^{-1}\ MS$)	17.8	19.7	16.1	ns	18.3 ^b	12.5 ^a	11.4 ^a	*
C_4 ($g\ kg^{-1}\ MS$)	10.3	13.3	9.9	ns	4.3	4.1	1.3	ns
alcools ($g\ kg^{-1}\ MS$)	50.2	45.9	41.3	ns	30.7	36.0	17.5	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil $p < 0.05$

() hypothèse d'égalité des variances rejetée ; GS = glucides solubles

$N-NH_3$ cor. = $N-NH_3$ corrigé par l'apport maximal d'ammoniac provenant de la décomposition du tétraformiate d'ammonium
en caractères gras : sucres solubles apportés par la mélasse

en caractères maigres et italiques : glucides solubles totaux, mélasse + fourrage

III.4.5.2. Bactéries lactiques et enzymes, stimulants de la fermentation

L'apport de ferments et d'enzymes (Caylasil®) est comparé avec différentes additions de sucres solubles (T1, T2 et T3). Le témoin est le traitement T6 (§ III.2.1.3. - p 106).

Dactyle récolté humide (MS = 21 %)

Avec une quantité de glucides solubles suffisante, les ensilages sont bien conservés, mais présentent des proportions de N-NH₃ encore élevées (tableau 46). Les ferments lactiques semblent augmenter la production d'acide lactique (pH inférieur) lorsque les glucides fermentescibles ne sont pas limitants (Gouet *et al.*, 1979 ; Lundén Petterson *et al.*, 1990). Bien qu'elle soit insuffisante, la protection des matières azotées semble meilleure avec l'apport de conservateur biologique associé à la mélasse. En début de fermentation, les ferments biologiques apportés pourraient être pénalisés par la pression osmotique liée à la présence de mélasse non diluée sur l'andain ; cet effet néfaste pourrait intervenir jusqu'à la libération des sucs cellulaires, avec la mort et la plasmolyse des cellules du fourrage. Cet opposition "mélasse - ferments" pourrait expliquer en partie les quantités élevées d'ammoniac dans les ensilages même additionnés de ferments lactiques et avec une quantité de glucides solubles suffisante.

Tableau 46 : Influence de l'incorporation de Caylasil® sur du dactyle (D1), récolté au stade feuillu avec une teneur en MS de 21 %, à la Plaine des Cafres, en mars 1993

traitement	T1	T2	T3	T6	
glucides solubles (g kg ⁻¹ MS)	0 - 30	70 - 100	120 - 150	120 - 150	
Caylasil®	oui	oui	oui	non	sign. F
teneur en MS (%)	21.1 ^a	23.6 ^b	23.1 ^b	22.8 ^b	**
pH	4.03 ^c	3.76 ^{ab}	3.74 ^a	3.84 ^b	***
ΔpH	0.02 ^b	-0.35 ^a	-0.35 ^a	-0.25 ^a	***
N soluble (% N total)	49.6 ^b	43.5 ^a	43.3 ^a	45.7 ^{ab}	*
N-NH ₃ (% N total)	13.3	11.0	12.5	13.6	ns
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	338	380	253	219	ns
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	19.1	22.5	14.7	12.8	ns
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	1.1 ^b	0.1 ^a	0.3 ^a	0.1 ^a	*
alcools (g kg ⁻¹ MS)	3.3 ^a	4.5 ^b	3.6 ^a	4.9 ^b	**

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05

() hypothèse d'égalité des variances rejetée ; en caractères gras : sucres solubles apportés par la mélasse

en caractères maigres et italiques : glucides solubles totaux, mélasse + fourrage

Dans les deux balles T2 et T6 (annexe D - tableau D11 - p 77) concernées par le suivi des fermentations (F5 - § III.2.1.4. - p 109), les températures ont augmenté jusqu'à la température ambiante (27 °C) ; la grande quantité d'eau du fourrage a absorbé le dégagement de chaleur dû à la respiration.

Dans les deux balles, durant 30 heures, le pH a baissé rapidement jusqu'à 4.2, puis, lentement jusqu'au pH de stabilité atteint après 40 et 65 heures pour T6 et T2, respectivement. La baisse de pH a été plus nette dans la balle avec Caylasil®, mais a marqué un arrêt plus brutal signifiant des difficultés à achever l'acidification par manque de glucides fermentescibles ; l'action des enzymes apportées par Caylasil® est limitée ou trop lente. Les cinétiques de débit gazeux, caractérisant surtout la respiration, ont été similaires.

Dactyle préfané (MS = 30 %)

Ces ensilages sont excellents mais la proportion d'azote ammoniacal reste un peu élevée (tableau 47). La quantité de glucides solubles a été suffisante, sauf pour T1 ; mais la teneur en MS de cet ensilage est plus élevée, ce qui explique une acidification correcte. L'incorporation de ferments biologiques, effectuée ici avec des quantités de glucides solubles non limitantes, semble améliorer encore la qualité de conservation et mieux préserver les matières azotées ; les faibles différences constatées ne sont cependant pas statistiquement significatives.

Tableau 47 : Influence de l'incorporation de Caylasil® sur du dactyle (D2), récolté au stade feuillu avec une teneur en MS de 30 %, à la Plaine des Cafres, en juin 1993

traitement	T1	T2	T3	T6	
glucides solubles (g kg ⁻¹ MS)	0 - 60	50 - 110	70 - 130	70 - 130	
Caylasil®	oui	oui	oui	non	sign. F
teneur en MS (%)	35.2	28.9	29.6	34.0	ns
pH	4.19 ^b	4.02 ^{ab}	3.85 ^a	4.04 ^{ab}	*
ΔpH	-0.38	-0.30	-0.50	-0.49	ns
N soluble (% N total)	55.0	48.3	46.8	61.3	ns
N-NH ₃ (% N total)	9.1	8.6	7.2	9.7	ns
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	109	130	95	67	ns
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	6.2	7.4	5.5	3.8	ns
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	0.3	0.3	0.0	0.1	ns
alcools (g kg ⁻¹ MS)	6.5	6.5	5.5	6.0	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001
les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05
() hypothèse d'égalité des variances rejetée ; en caractères gras : sucres solubles apportés par la mélasse
en caractères maigres et italiques : glucides solubles totaux, mélasse + fourrage

Dans le suivi des fermentations (F8 - § III.2.1.4. - p 109), la respiration paraît plus importante dans la balle T2 (dégagement gazeux), vraisemblablement à cause d'une teneur en MS plus faible. Les pH sont très voisins et les caractéristiques fermentaires (annexe D - tableau D12 - p 77) signifient des ensilages bien conservés. L'apport de ferments (T2) a permis une acidification plus intense (annexe D - figure D8 - p 78), mais le pH de stabilité, compte tenu de la différence des teneurs en MS, a été obtenu dans les mêmes délais, relativement longs, pour T2 et T6 : près de 4 jours.

Les ferments biologiques ont permis la production d'une plus grande quantité d'acide lactique. Mais la proportion d'ammoniac reste un peu élevée : le pH étant resté élevé durant 48 heures, cette production peut provenir de bactéries anaérobies facultatives (genre *Enterobacter*) qui se sont développées avant la flore lactique, malgré une bonne étanchéité des balles réalisée aussitôt le pressage. La connaissance de la population bactérienne présente sur le fourrage avant le pressage pourrait fournir des explications sur les caractéristiques fermentaires constatées.

Kikuyu avec stolons et humide (MS = 20 %)

Ces ensilages de kikuyu sont de qualité très médiocre, avec beaucoup d'ammoniac et d'acide butyrique provenant du développement de la flore butyrique (tableau 48). L'effet "mélasse" est à nouveau prépondérant. Bien que les moyennes ne soient pas significativement différentes, les plus faibles valeurs des produits de fermentation (De Figueiredo *et al.*, 1994), excepté pour l'azote soluble, ont été obtenues avec des ferments biologiques et des glucides solubles en quantité suffisante. De plus, pour le traitement T3, la production d'acide lactique a été vraisemblablement plus importante que dans les autres traitements, mais non suffisante pour stabiliser l'ensilage à un pH assez bas (< 4.00).

Tableau 48 : Influence de l'incorporation de Caylasil® sur du kikuyu (K1), récolté avec beaucoup de stolons, avec une teneur en MS de 20 %, à la Plaine des Cafres, en avril 1993

traitement	T1	T2	T3	T6	
glucides solubles (g kg ⁻¹ MS)	0 - 20	40 - 60	70 - 90	70 - 90	
Caylasil®	oui	oui	oui	non	sign. F
teneur en MS (%)	20.4	22.5	20.8	21.8	ns
pH	4.83 ^b	4.41 ^a	4.11 ^a	4.35 ^a	**
ΔpH	0.89 ^b	0.36 ^a	0.13 ^a	0.35 ^a	**
N soluble (% N total)	54.2	55.0	65.5	63.1	ns
N-NH ₃ (% N total)	21.6 ^b	16.6 ^a	19.4 ^{ab}	22.9 ^b	*
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	777 ^b	379 ^a	289 ^a	395 ^a	***
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	28.5 ^b	14.2 ^a	11.3 ^a	16.0 ^a	***
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	16.2 ^b	9.7 ^a	6.3 ^a	8.1 ^a	*
alcools (g kg ⁻¹ MS)	56.0 ^{bc}	37.4 ^a	40.3 ^{ab}	65.3 ^c	(**)

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05

() hypothèse d'égalité des variances rejetée ; en caractères gras : sucres solubles apportés par la mélasse

en caractères maigres et italiques : glucides solubles totaux, mélasse + fourrage

La structure stolonifère du kikuyu ne semble pas favorable à une acidification efficace. Les stolons restent très humides, même après préfanage et la récolte en brins entiers ne permet pas de libérer efficacement les glucides solubles contenus dans ses tiges. L'hétérogénéité de la teneur en MS à l'intérieur de l'andain et par suite aussi à l'intérieur de la balle doit alors intervenir, et cela beaucoup plus qu'avec un fourrage haché finement.

Certaines parties de la balle sont probablement plus humides que ne le laisse supposer la teneur moyenne en MS, le pH de stabilité doit donc être plus bas : développement de la flore butyrique dans des micro-niches (Demarquilly, 1979). De plus, il est possible que ces stolons abritent des levures qui produisent des alcools et concurrencent la flore lactique (Célanie, 1982).

Durant le suivi des fermentations (F6 - § III.2.1.4. - p 109), dans les balles T2 et T6, la température est montée progressivement de 22 °C à 28 °C et s'est stabilisée à ce niveau durant toute la période du suivi fermentaire, alors que la température ambiante était de 25 °C. Compte tenu de la quantité d'eau présente dans le fourrage, cette élévation de température, et surtout son maintien traduit une respiration et des fermentations importantes, notables à travers la perte de poids des balles qui traduit des pertes en MS importantes (annexe D - tableau D13 - p 78). Les courbes de pH et de débit gazeux (figures 23 et 24) montrent clairement une reprise des fermentations après 4 jours, consécutive à une baisse insuffisante du pH dans la balle T2. La balle T6 semble s'être mieux acidifiée, mais le pH de stabilité a été atteint trop tardivement (100 heures), d'où une remontée du pH ultérieurement.

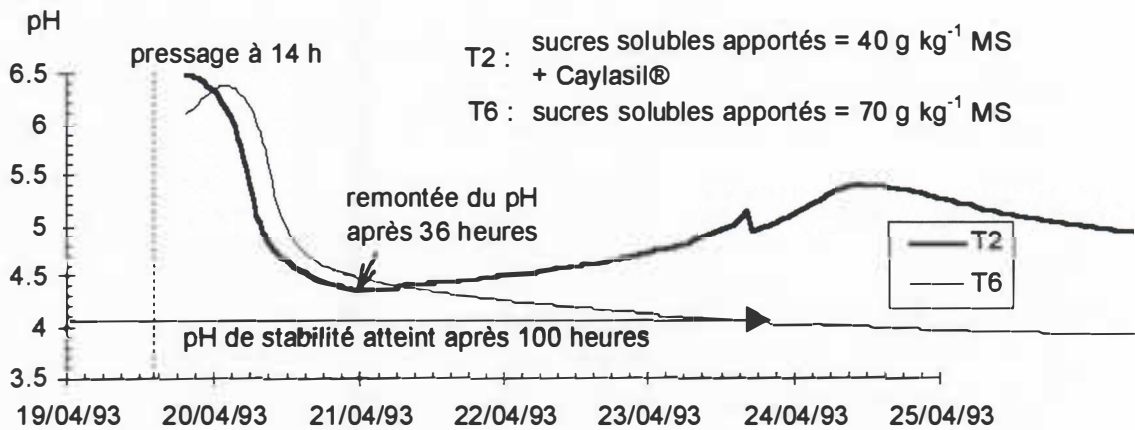


Figure 23 : Suivi du pH (essai F6) de deux balles (T2 et T6) de kikuyu (K1) récolté avec beaucoup de stolons, avec une teneur en MS de 20 %, à la Plaine des Cafres en avril 1993

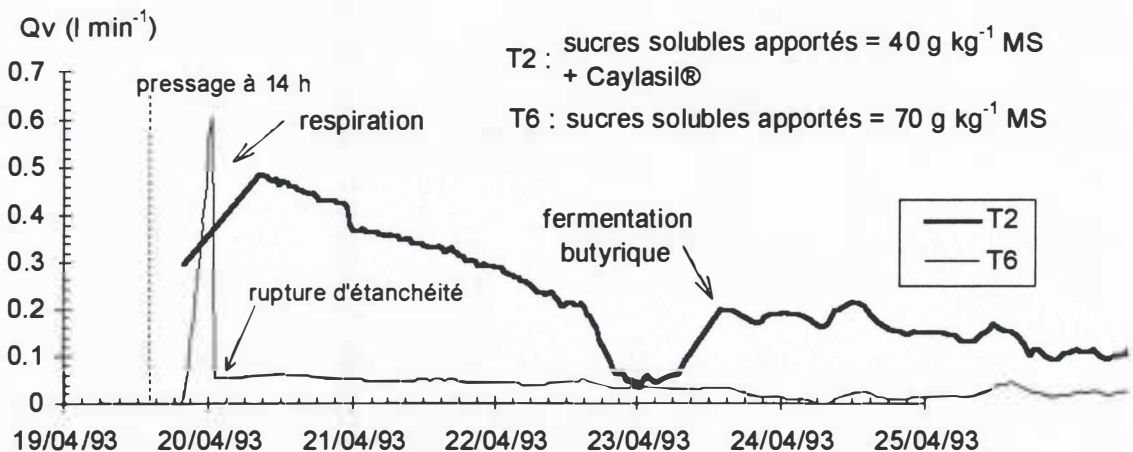


Figure 24 : Suivi des débits gazeux (essai F6) de deux balles (T2 et T6) de kikuyu (K1) récolté avec beaucoup de stolons, avec une teneur en MS de 20 %, à la Plaine des Cafres en avril 1993

Kikuyu au stade feuillu et humide (MS = 22 %)

Ces ensilages sont mal stabilisés (tableau 49). Pour la plupart des caractéristiques, les différences ne sont pas significatives. Le conservateur biologique avec apport de sucres solubles, comme dans le cas précédent, semble tout de même améliorer les fermentations (De Figueiredo *et al.*, 1994). Malgré l'incorporation de ferments et d'enzymes, cette amélioration reste très insuffisante pour assurer une conservation correcte du kikuyu en balles enrubannées.

Tableau 49 : Influence de l'incorporation de Caylasil® sur du kikuyu (K2), récolté au stade feuillu, avec une teneur en MS de 22 %, à la Plaine des Cafres, en mai 1993

traitement	T1	T2	T3	T6	
glucides solubles (g kg ⁻¹ MS)	0 - 30	50 - 80	60 - 90	60 - 90	
Caylasil®	oui	oui	oui	non	sign. F
teneur en MS (%)	21.4 ^a	23.5 ^b	24.0 ^b	23.5 ^b	*
pH	5.31	4.48	4.53	4.79	ns
ΔpH	1.31 ^b	0.40 ^a	0.40 ^a	0.70 ^{ab}	*
N soluble (% N total)	58.7	56.8	57.6	57.6	ns
N-NH ₃ (% N total)	19.5	16.9	15.4	16.7	ns
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	477	389	329	326	ns
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	23.7	16.4	17.5	15.5	ns
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	4.8	6.9	1.9	3.7	ns
alcools (g kg ⁻¹ MS)	35.2	36.5	19.6	31.3	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05

en caractères gras : sucres solubles apportés par la mélasse

en caractères maigres et italiques : glucides solubles totaux, mélasse + fourrage

Dans le suivi des fermentations (F7 - § III.2.1.4. - p 109), la température du fourrage est passée de 19 à 25 °C (température ambiante). Le pH de stabilité (4.09) a été atteint dans les deux balles après 60 heures (annexe D - tableau D14 - p 79) ; les profils d'acidification ont été identiques dans les deux balles. Malgré cela, à partir du 6^{ème} jour, le pH est progressivement remonté, signifiant le démarrage de l'activité butyrique. Cependant, la contamination en spores de *Clostridium* et la quantité d'acide butyrique produit sont faibles, notamment pour la balle T2.

III.4.6. Couleur du film étirable

En 1990, un film blanc (A) et un film noir (B), ont été utilisés simultanément. L'enrubannage a été réalisé en 4 couches avec recouvrement de 50 %. La comparaison a porté sur 19 balles blanches et 17 noires. Aucune différence significative (test T) liée à la couleur du film n'a été notée (tableau 50). La contamination en spores, élevée avec les deux films, semble cependant légèrement plus importante avec le film noir (Lingvall *et al.*, 1989). Si la couleur ne semble pas influente, les caractéristiques d'étanchéité restent primordiales dans le choix du film.

Tableau 50 : Influence de la couleur du film sur la conservation des ensilages en 1990

caractéristiques	film blanc	film noir	caractéristiques	film blanc	film noir
perméabilité relative à l'air	100	134	N soluble (% N total)	44.3	44.0
apport sucres sol. (% MS)	14.8	13.3	N-NH ₃ (% N total)	13.3	12.7
proportion d'esp. temp. (%)	55	77	AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	507	411
MAT (g kg ⁻¹ MS)	140	142	C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	20.1	16.7
teneur en MS (%)	30.1	29.9	C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	11.6	9.0
pH	4.44	4.36	alcools (g kg ⁻¹ MS)	5.4	6.3
ΔpH	0.04	-0.03	NPP (spores g ⁻¹ MV)	23741	35296

III.4.7. Conclusion

III.4.7.1. influence de la teneur en MS

La teneur en MS est très nettement le principal facteur déterminant la qualité de conservation. Elle dépend des conditions de récolte, avec par ordre discriminant : conditions climatiques, fourrage (stade, teneur en MAT, proportion d'espèces tempérées, rendement fourrager) et conditions de mécanisation. L'espèce fourragère est déterminante pour l'obtention d'une teneur en MS élevée. En effet, le kikuyu est difficile à sécher, même en conditions climatiques favorables ; il faut jouer sur son rendement fourrager en récoltant à un stade jeune.

Toutes les caractéristiques fermentaires des ensilages sont liées négativement par des fonctions de type logarithmique à la teneur en MS. Les teneurs en azote ammoniacal (% N total) et en C₄ restent assez élevées même au-delà 33 % de MS. Lorsque la quantité de glucides solubles n'est pas limitante, les ensilages présentent un profil fermentaire plutôt lactique si la teneur en MS est supérieure à 27 %. En dessous de ce seuil, l'acidification est moindre et les teneurs en acides acétique, butyrique et en alcools sont élevées. L'intensité d'acidification des ensilages préfanés ou mi-fanés est moins importante que celle des ensilages simplement ressuyés, mais leur stabilité est obtenue plus rapidement. La contamination en spores butyriques ne devient réellement faible que pour une teneur en MS supérieure à 40 %. Trois seuils (22, 27 et 40 % MS), définissent 4 classes de qualité de conservation : < 22 % pour les mauvais ensilages, de 22 et 27 % pour les ensilages médiocres à moyens, de 27 à 40 % pour les ensilages moyens à bons, et > 40 % pour les ensilages excellents.

III.4.7.2. Influence de l'apport de sucres solubles

L'apport de sucres solubles n'est pas le premier facteur d'orientation des fermentations : il permet une acidification plus importante (Tjandraatmadja, 1994ab) mais en augmente peu la vitesse. Il réduit la production d'ammoniac et d'acide butyrique. Cet apport de mélasse favorise systématiquement la production d'alcools.

La fabrication importante d'ammoniac dans la plupart des ensilages, même pour une teneur en MS assez élevée et sans production importante d'acide butyrique, pourrait provenir de l'activité protéolytique de bactéries anaérobies facultatives (genre *Enterobacter*) (Heron *et al.*, 1993), voire de certaines bactéries lactiques.

Dans le cas de graminées tempérées, l'apport de mélasse compense la pauvreté en glucides solubles du fourrage, en favorisant une acidification lactique plus poussée, à condition que la teneur en MS soit suffisamment élevée (> 27 %). En dessous de cette teneur, l'acidification n'est pas assez rapide et la flore butyrique, favorisée par des températures élevées (Célanie, 1982), devient vite performante et dégrade les ensilages.

Dans le cas du kikuyu, les ensilages sont très mal conservés en dessous de 27 % de MS, présentant des caractéristiques butyriques marquées et l'apport de mélasse améliore peu cette conservation, voire renforce l'action de bactéries non désirées. Pour une teneur en MS supérieure à 27 %, l'acidification lactique paraît suffisante, mais elle n'est pas assez rapide ; la production d'ammoniac est toujours élevée ainsi que dans une moindre mesure celle d'acide butyrique. Même lorsque le kikuyu est récolté en mélange avec des graminées tempérées, il faut atteindre 40 % de MS pour que l'ensilage soit bien conservé. Le hachage du fourrage avec une ensileuse coupe-fine, ou avec les presses à couteaux, devrait améliorer la conservation des ensilages de kikuyu préfané à 35 % de MS. Compte tenu des mauvaises pratiques actuelles dans la confection des silos (Hassoun, à paraître) et de l'utilisation récente des presses à couteaux à La Réunion, nous n'avons pas de données permettant de vérifier ce point.

III.4.7.3. Influence de l'apport de conservateurs

Le sel d'acide formique sous forme de tetraformiate d'ammonium n'est pas un conservateur efficace dans nos conditions. Même à dose élevée ($5 \text{ l t}^{-1} \text{ MV}$), il réduit peu les produits de fermentations (N-NH_3 , C_2 , C_4). De plus, il inhibe la flore lactique, ce qui conduit à des ensilages très instables. La dissociation de ce conservateur semble trop lente ou incomplète peut-être à cause de la structure en brins entiers du fourrage. McDonald *et al.* (1991) note par contre un effet positif sur du fourrage haché finement. Un essai avec du fourrage haché serait nécessaire. D'autre part, la libération d'ammoniac qui résulte de la décomposition du TFA n'est guère compatible avec l'ensilage d'herbe qui en présente déjà trop, notamment à La Réunion.

Le conservateur biologique Caylasil® semble plus intéressant car il permet une meilleure acidification lactique, à condition d'apporter une quantité de sucres solubles suffisante. Les produits de fermentation sont diminués, mais la protection des matières azotées demeure insuffisante dans le cas des ensilages humides. L'activité enzymatique de ce conservateur paraît peu efficace : la décomposition des parois en glucides solubles est faible ou trop lente, peut-être en raison d'une quantité incorporée trop faible (Pitt, 1990 ; Spoelstra *et al.*, 1990), pour un développement suffisamment rapide des bactéries lactiques. Ce conservateur n'est intéressant que pour des fourrages présentant une teneur en MS suffisamment élevée (> 30 %) et en présence d'une quantité importante de glucides solubles (100 à $120 \text{ g kg}^{-1} \text{ MS}$) (Demarquilly, 1986, 1993).

III.5. Comparaison avec d'autres techniques d'ensilage

Depuis une quinzaine d'années, quelques éleveurs réalisent des ensilages d'herbe, en coupe directe avec des récolteuses à fléaux. A partir de 1983, ont été utilisées des ensileuses double-coupe (rotor à fléaux pour la fauche, vis de transfert et plateau hacheur à couteaux). Les premières balles enrubannées ont été réalisées en 1990. Enfin, deux ensileuses coupe-fine munies d'un pick-up ont été acquises en 1992. Nous proposons ici une comparaison de ces techniques, sous l'angle de la conservation des ensilages, à partir des analyses des balles enrubannées et des silos réalisés de 1990 à 1994. Une étude sur la conservation et l'utilisation des ensilages en silos est actuellement en cours (Hassoun, à paraître) ; certaines de ces données récentes sont intégrées à cette présentation.

Les conditions de récolte (annexe D - tableau D15 - p 79) sont peu différentes d'une technique à l'autre. Cependant, les récoltes avec les ensileuses double-coupe et coupe-fine, utilisées par les grandes exploitations, se font dans des conditions de mécanisation plus facile, avec plutôt des espèces tempérées. La récolteuse à fléaux, utilisée dans les Hauts de l'Ouest et du Sud, ainsi que les balles enrubannées s'accommodent mieux des terrains difficiles et de la récolte de kikuyu.

D'après les caractéristiques fermentaires moyennes (tableau 51), les balles enrubannées, présentant une teneur en MS supérieure, sont nettement mieux conservées que les silos : malgré une proportion en ammoniac et une teneur en acide butyrique encore trop élevées, tous les produits de fermentations sont en quantité inférieure.

Contrairement à ce qu'on pouvait en attendre, compte tenu de la technique et des conditions de récolte, les silos réalisés avec l'ensileuse à fléaux ne sont pas plus mauvais que les autres silos (tableau 51). En pratique, les éleveurs utilisant encore cette technique ont pour habitude de faire des petits silos taupinières sur un à deux jours au maximum. L'étanchéité est assez bien réalisée. Humidité du fourrage et apport de terre par la machine sont les principaux problèmes de cette technique.

Avec des teneurs en MS comparables, les ensilages réalisés avec les ensileuses double-coupe ne sont pas meilleurs que ceux réalisés avec les ensileuses à fléaux. Réalisés pour la plupart dans des grandes structures d'élevage, la fermeture au niveau des murs des silos couloirs (impasses) est délicate. De plus, avec des dimensions excessives, le chargement se fait souvent sur 2 ou 3 jours. Il est également fréquent qu'un tas déjà fermenté soit découvert pour recharger du fourrage. Ces mauvaises pratiques et l'humidité du fourrage concourent à la confection d'ensilages très mauvais.

Pour les ensilages ressuyés en coupe fine, la conservation est également très mauvaise. Le ressuyage du fourrage est généralement insuffisant pour atteindre une teneur en MS assez élevée. Cependant, la mélasse est épandue sur l'andain et de ce fait bien mélangée dans la masse du fourrage ; il y a très peu de souillure par la terre ; les performances des matériels sont bonnes (temps de chantier courts). Par contre, les silos sont toujours trop grands, leur confection et leur étanchéité sont mal maîtrisées : le manque de technicité concourt à la confection de mauvais ensilages, alors que les équipements de récolte sont adéquats.

Tableau 51 : Comparaison des caractéristiques fermentaires moyennes d'ensilages réalisés avec différentes techniques

caractéristiques fermentaires	coupe directe		ressuyé	balles
	fléaux	double - coupe	coupe - fine	enrubannées
teneur en MS (%)	22.9	23.5	23.7	31.2
pH	4.47	4.38	4.53	4.31
ΔpH	0.35	0.23	0.38	-0.14
N soluble (% N total)	46.7	48.2	52.0	45.3
N-NH ₃ (% N total)	15.8	16.5	17.1	11.1
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	761	795	654	413
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	27.0	28.9	21.8	18.3
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	19.8	18.5	18.7	6.5
alcools (g kg ⁻¹ MS)	10.7	9.4	8.8	8.4
NPP (spores g ⁻¹ MV)	46635	53815	nd	44297
log (NPP) (g ⁻¹ MV)	3.3	3.8	nd	3.5

nd = non déterminé

Les notations et les proportions d'ensilages bien conservés, basées sur la note de conservation, sont éloquentes (tableau 52). Malgré l'utilisation des ensileuses coupe-fine depuis 1992, la qualité des silos ne s'est pas améliorée depuis l'enquête réalisée en 1987 (Brunschwig, 1988). Les balles enrubannées ont donc nettement amélioré la qualité des ensilages réalisés à La Réunion, principalement grâce à une meilleure maîtrise de la teneur en MS, à la régularité d'apport des sucres solubles, à la qualité de l'étanchéité et à la rapidité avec laquelle celle-ci est réalisée (peu de temps entre pressage et enrubannage). Si les deux premières techniques (fléaux, double-coupe) doivent être abandonnées, car elles ne permettent pas d'obtenir une teneur en MS suffisante, de hacher suffisamment fin et de réaliser des performances de chantier correctes, la technique d'ensilage ressuyé en brins courts doit trouver sa place dans les grandes exploitations, à condition de maîtriser la mise en silo. Pour cette technique, un apport de conservateur acide s'avère nécessaire pour assurer la conservation des fourrages peu ressuyés.

Tableau 52 : Comparaison des notes synthétiques moyennes qualifiant les ensilages réalisés avec différentes techniques

notations	coupe directe		ressuyé	balles
	fléaux	double - coupe	coupe - fine	enrubannées
stabilité (/20)	6.5	7.9	6.3	11.4
conservation (/20)	7.9	8.5	7.6	13.1
ingestibilité (/20)	10.3	10.2	10.8	14.5
qualité de l'azote (/20)	10.4	10.2	8.8	13.6
absence de spores (/20)	7.6	6.0	nd	7.6
proportion d'ensilages bien conservés (%)*	23	35	13	75

nd = non déterminé ; * = note de conservation > 10/20

III.6. Conclusion sur la conservation des ensilages

Les analyses multidimensionnelles effectuées sur les ensilages en balles enrubannées montrent que la qualité de conservation est liée à une teneur en MS et à une proportion d'espèces tempérées élevées, et à de bonnes conditions de récolte (mécanisation, météorologie). Les régions se différencient très nettement sur ces principaux aspects : ensilages médiocres dans les Hauts de l'Ouest, moyens à la Plaine des Cafres et bons à la Plaine des Palmistes. L'étude séparée des principaux facteurs identifiés conduit à plusieurs précisions.

La teneur en MS, influencée par les conditions météorologiques, les caractéristiques du fourrage (espèce, stade, teneur en MAT, rendement fourrager) et les conditions de mécanisation, est le principal facteur de conservation. Toutes les caractéristiques fermentaires y sont liées négativement. Trois teneurs en MS ont été retenues comme seuils : 22, 27 et 40 %, correspondant à des ensilages mauvais ($MS < 22\%$), médiocres à moyens ($22\% < MS < 27\%$), moyens à bons ($27\% < MS < 40\%$) et excellents ($MS > 40\%$). La proportion d'azote ammoniacal et la teneur en acide butyrique restent cependant assez élevées jusqu'à 33 % de MS. La contamination en spores butyriques ne devient réellement faible qu'au delà 40 % de MS.

L'espèce est déterminante. Le kikuyu, malgré un pouvoir tampon faible, un apport important de sucres solubles, et une teneur en MS assez élevée s'ensile difficilement. Les graminées tempérées s'ensilent correctement si la teneur en MS dépasse 27 % et à condition de compenser la pauvreté en glucides solubles du fourrage, même pour les ray-grass.

L'apport de mélasse permet d'ensiler des fourrages pauvres en glucides solubles, mais ce n'est pas le facteur principal de l'orientation des fermentations. Il permet une acidification plus poussée, mais n'améliore pas ou peu la vitesse d'acidification. Il réduit les produits de fermentations indésirables (ammoniac, acides acétique et butyrique), mais augmente la production d'alcools. Pour les ensilages humides, la diminution de produits indésirables reste insuffisante, même avec une quantité importante de mélasse. Celle-ci renforce même, parfois, l'action de bactéries peu acidifiantes. Elle ne permet vraiment une bonne conservation que si la teneur en MS est supérieure à 27 et 40 % pour les graminées tempérées et le kikuyu, respectivement (De Figueiredo *et al.*, 1989).

L'acide formique sous forme de sel d'ammonium, même à des doses élevées, s'est avéré inefficace en ne réduisant pas les produits de fermentation. L'ensilage est peu acidifié, car son action est lente et inhibe les bactéries lactiques. De plus, l'ammoniac résultant de sa dissociation s'ajoute aux quantités déjà importantes produites par les fermentations. Pour protéger les matières azotées, un mélange d'acide formique et de formol serait préférable. L'utilisation d'un conservateur biologique composé de bactéries lactiques et d'enzymes s'est avéré intéressant avec une quantité de glucides solubles suffisante ($100 \text{ à } 120 \text{ g kg}^{-1} \text{ MS}$), car l'activité des enzymes paraît faible ou trop lente pour permettre une libération de glucides en quantité suffisante. L'activité du conservateur et l'apport de sucres solubles sont synergiques (Jonsson *et al.*, 1993) : la quantité d'acide lactique est augmentée et les produits de fermentations sont diminués. Cependant, comme pour l'apport de mélasse, l'incorporation de bactéries lactiques n'est vraiment efficace que pour une teneur en MS suffisante.

La couleur du film n'est pas déterminante pour la conservation des ensilages. Cependant, les températures élevées mesurées sous le film noir provoquent une augmentation de la perméabilité du film (Daponte, 1991). Températures élevées, condensation et perméabilité sont favorables à la prolifération des levures et des moisissures (Lingwall *et al.*, 1989). Dans les conditions climatiques de La Réunion, un enrubannage avec six couches de film au lieu de quatre garantirait une meilleure étanchéité (multipliée par 2 ou 3 selon les films, § II.4.5.2.) et une meilleure conservation (Gieroba *et al.*, 1994). Des essais sont actuellement en cours.

Au delà de ces conclusions, différentes remarques, questions ou hypothèses peuvent être formulées. Tout d'abord sur le plan méthodologique, les suivis de pressions dans les balles et les conversions en débits gazeux par la mesure d'étanchéité n'ont pas donné les résultats escomptés. En effet, les dégagements de CO₂ durant la phase de respiration sont intenses et provoquent une montée en pression rapide et une rupture d'étanchéité. Celle-ci se reforme ensuite, mais les quantités de gaz s'échappant lors de cette rupture ne sont pas quantifiables. L'étanchéité de l'enrubannage durant la conservation n'est donc pas constante.

Ensuite, concernant les processus fermentaires, certains résultats de conservation posent quelques questions. En effet, les proportions d'azote ammoniacal sont souvent élevées. Lorsqu'on constate une production importante d'acides acétique et butyrique, l'ammoniac provient d'une dégradation des matières azotées de l'ensilage par les bactéries butyriques protéolytiques. Or, dans de nombreux ensilages, la production d'ammoniac est importante alors que celle d'AGV est faible et que le pH est bas (ensilages stables). La dégradation des matières azotées a donc lieu rapidement après la mise en silo. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées : protéolyse enzymatique intense favorisée par des températures élevées et une baisse du pH assez lente (Brady, 1960, Gouet *et al.*, 1964, *in* : McDonald *et al.*, 1991), activité de bactéries anaérobies facultatives du genre *Enterobacter* (Henderson, 1984, 1987, *in* : McDonald *et al.*, 1991), ou dégradation des acides aminés par certaines bactéries lactiques (Heron *et al.*, 1986, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Dans le cas des ensilages humides, l'apport de mélasse pourrait favoriser préférentiellement le développement de certains micro-organismes.

De plus, dans les balles enrubannées confectionnées à La Réunion, la production d'ammoniac ne correspond pas forcément à une augmentation de la proportion d'azote soluble. En effet, pour des teneurs en MS comparables, les proportions d'azote soluble dans l'ensilage sont très inférieures à celles mesurées en métropole (Delacroix, 1992), alors que celles d'azote ammoniacal sont comparables. Or, les fourrages de La Réunion présentent des proportions d'azote soluble supérieures à 30 % de N total (Brunschwig, résultats non publiés), comparables à celles de métropole (Demarquilly *et al.*, 1980b). Dans les ensilages en balles enrubannées de La Réunion, il y a donc une dégradation préférentielle des matières azotées solubles en ammoniac, alors que les protéines semblent peu dégradées ; ce constat peut laisser penser que certaines bactéries lactiques interviennent dans la dégradation des acides aminés.

Enfin, des études microbiologiques seraient nécessaires pour mieux connaître les processus fermentaires en jeu dans les ensilages en balles enrubannées, notamment avec des fourrages humides, du kikuyu ou d'autres fourrages tropicaux : études des populations épiphytes, cinétiques de leur développement dans les ensilages, influence de la mélasse de canne à sucre sur le développement de ces populations.

4^{ème} Partie :

APPROCHE DU COÛT DE REVIENT DE L'ENSILAGE EN BALLES ENRUBANNEES

IV.1. Introduction

Dans le contexte d'élevage des Hauts de La Réunion, plusieurs techniques pour constituer des stocks fourragers sont actuellement disponibles. L'évaluation des coûts engendrés par la constitution de ces stocks est nécessaire afin de mieux cerner les conditions d'utilisation économiquement intéressantes pour chacune des techniques. En effet, le coût est un des éléments du choix fait par l'éleveur. Les autres éléments sont la qualité de conservation du fourrage, le gain de production (lait ou viande) permis par ce stock, la disponibilité en matériels et en main d'oeuvre, la pénibilité des opérations de récolte, les difficultés d'organisation du travail, la souplesse dans la gestion des stocks en cours d'utilisation.

L'ensilage en coupe directe avec des récolteuses à fléaux ou double-coupe a été étudié dans les Hauts de l'Ouest, à la Plaine des Cafres et dans les Hauts de Sud (Paillat, 1987a, 1988ab ; Brunschwig, 1988). Par ailleurs, une simulation des coûts de récolte d'herbe sous forme d'ensilage par différentes chaînes de matériels (Paillat, 1988b), a été un des éléments déterminant le financement à titre expérimental, par la Région Réunion, de la chaîne d'ensilage en balles enrubannées. A la demande des organismes de développement et en collaboration avec eux, un volet "évaluation des coûts de récolte" a été retenu dans le projet de recherche. D'autre part, depuis 1992, la technique d'ensilage d'herbe ressuyée en brins courts est en cours d'étude par l'Union des A.F.P. et la C.U.M.A. des Plaines, avec l'appui du C.I.R.A.D..

Des enquêtes visant à caractériser les chantiers ont donc été réalisées durant les deux premières années de fonctionnement de la chaîne d'ensilage en balles enrubannées (1990 et 1991). Les coûts de l'ensilage ont été calculés à partir de la méthode développée par l'I.G.E.R.⁶⁸ et le B.C.M.E.A.⁶⁹. Par ailleurs, à titre de référence, il est possible de comparer les coûts à ceux calculés en France métropolitaine avec la même méthode par Gaillard *et al.* (1989).

Après un premier chapitre consacré aux méthodes d'enquête et de calcul des coûts, le second chapitre présente les caractéristiques des chantiers d'ensilage en balles enrubannées avec les temps de travaux. Une approche de la structure des coûts avec la différenciation entre les coûts fixes et les coûts variables est proposée dans le troisième chapitre. Un quatrième chapitre est consacré aux facteurs qui interviennent dans le coût. Enfin, le cinquième chapitre traitera de la comparaison, sur le plan des coûts de récolte, des diverses techniques d'ensilage utilisées à La Réunion, et de la comparaison avec l'utilisation de foin produit dans les Bas. Tout au long de cette partie, les différences locales des principales régions d'élevage de l'île sont mises en évidence.

⁶⁸ Institut de Gestion et d'Economie Rurale

⁶⁹ Bureau Commun du Machinisme et des Equipements Agricoles devenu Bureau de Coordination du Machinisme Agricole

IV.2. Matériels et méthodes

IV.2.1. Enquêtes sur les chantiers de récolte

La confection des ensilages en balles enrubannées a été suivie durant deux années sur différents chantiers choisis au hasard dans les différentes régions d'élevage (Brunschwig, 1990). Les enregistrements de données ont porté sur 15 chantiers en 1990 et sur 24 en 1991 soit 63 et 57 % des chantiers, respectivement (annexe E - p 83) :

- espèce dominante récoltée en précisant la proportion de chaque espèce fourragère permettant de calculer la proportion d'espèces tempérées,
- stade (feuillu = 1, montaison = 2, début épiaison = 3, épiaison = 4, floraison ou stolons pour le kikuyu = 5),
- mois de récolte (été = 1, 2 ou 3, automne = 4 ou 5, hiver = 6, 7 ou 8),
- conditions de mécanisation (facile = 1, assez facile = 2, difficile = 3, très difficile = 4), incluant les difficultés de terrain (pente, forme des parcelles, pierres) et celles liées au fourrage (stolons, humidité, densité des andains, herbe courte ...),
- conditions climatiques (beau = 1, nuageux = 2, couvert = 3, pluie = 4),
- temps de travaux mesurés par opération de récolte (précision = 10 min),
- main d'oeuvre nécessaire,
- puissance des tracteurs utilisés,
- quantité de mélasse épandue,
- nombre de balles réalisées,
- poids des balles mesuré sur l'enrubanneuse avec trois pèse-essieux en 1990 et avec un manomètre hydraulique en 1991 (annexe E - p 84),
- surface récoltée mesurée au topofil,
- teneur en MS déterminée à l'étuve (80 °C pendant 24 h) en 1990 et au four à micro-ondes (Corrot, 1991) en 1991 (annexe E - p 85), à partir d'un prélèvement, effectué avec une carotteuse (§ III.2.2.1. - p 111), par balle d'ensilage pour 3 à 5 balles par chantier.

IV.2.2. Principe de calcul des coûts de la production fourragère et de la récolte en balles enrubannées

IV.2.2.1. Méthode proposée par l'I.G.E.R. et le B.C.M.E.A.

Cette méthode de calcul des coûts (Fiévet, 1982) distingue les coûts fixes annuels décrits par les équations [3], [4] et [5], et les coûts variables horaires comprenant les frais de réparations et de consommables décrits par les équations [6], [7], [8], [9] et [10].

Cette approche n'est pas une analyse comptable des charges de mécanisation des exploitations, mais plutôt une méthode d'estimation des coûts de mécanisation dans la perspective de gestion des équipements (Cairol *et al.*, 1990).

$$[3] \quad AM = VA \frac{1 - (1 - d)^n}{n}$$

$$[4] \quad FF = VA \quad Ti \quad \frac{\sum_{i=1}^n (1 - d)^{i-1}}{n}$$

$$[5] \quad FD = 0.01 \quad VA$$

$$[6] \quad FR = Tr \quad VA$$

$$[7] \quad FC = 0.24 \quad Tc \quad P \quad Pgo$$

$$[8] \quad FL = (0.12 \quad P + 0.89 \quad RM) \quad Ph / 100$$

$$[9] \quad FT = (0.46 \quad P + 48) / 200$$

$$[10] \quad FP = 0.38 \quad P - 0.43 \quad RM - 8.2$$

AM = amortissements (F),

d = taux de dépréciation (%),

FC = frais de carburants (F),

FD = frais divers : assurances et remisage (F)

FF = frais financiers (F),

FL = frais de lubrifiants (F),

FP = frais de pneumatiques (F),

FR = frais de réparations (F),

FT = frais d'achat des filtres (F),

n = durée d'amortissement,

P = puissance nominale du moteur (ch),

Pgo = prix du gas-oil (F l⁻¹),

Ph = prix de l'huile (F l⁻¹).

RM = nombre de roues motrices,

Tc = taux de charge du moteur (%),

Ti = taux d'intérêt (%),

Tr = taux de réparation par matériel (%),

VA = valeur d'achat (F).

Les équations [8], [9] et [10] ont été établies avec les données de Fiévet (1982) et Vincent (1986), en tenant compte des contraintes spécifiques à La Réunion notamment pour les pneumatiques. Dans l'équation [6], les coefficients Tr donnés par Fiévet (1982) pour différents matériels ont été doublés (ou ajustés lorsque les frais de réparations étaient connus) pour tenir compte des conditions difficiles d'utilisation à La Réunion et du prix élevé des pièces détachées. A partir de ces formules, les coûts des tracteurs appartenant aux éleveurs ont été calculés en fonction de la puissance pour une durée d'utilisation annuelle moyenne de 600 heures, correspondant approximativement à une durée normale pour les exploitations d'élevage (annexe E - p 85) :

$$[11] \quad CT = 0.99 \quad P + 24.61 \quad (r^2 = 0.986 ; p < 0.01) \quad (CT = \text{coût total})$$

IV.2.2.2. Différenciation des coûts fixes et variables

Pour analyser les chantiers et comparer les techniques d'ensilage, deux niveaux de coûts, correspondant pour l'éleveur à des dépenses de natures différentes, ont été distingués :

- les coûts fixes intervenant dans la récolte du fourrage, liés aux investissements réalisés pour l'exploitation d'élevage,
- les coûts variables correspondant à la sortie d'argent nécessaire pour la récolte.

Les coûts fixes (sans sortie d'argent spécifiquement pour la récolte) regroupent :

- les coûts fixes des tracteurs et machines appartenant à l'éleveur, à savoir, amortissements, frais financiers et frais divers (§ IV.2.2.1.),
- la rémunération de la main d'oeuvre fournie par l'éleveur (fixée à 50 F h⁻¹).

Les coûts variables regroupent :

- les coûts de fonctionnement des tracteurs et machines fournis par l'agriculteur : carburant, lubrifiants, pneumatiques, frais d'entretien et de réparation (§ IV.2.2.1.),
- le coût correspondant à l'achat de la mélasse,
- le coût de location des machines et de fourniture de consommables (ficelle, film étirable) facturées par l'Union des A.F.P.,
- le coût de location des tracteurs et machines auprès d'une entreprise,
- le coût éventuel de main d'oeuvre louée à l'extérieur.

Le coût de la production fourragère, identique quel que soit le mode de récolte envisagé, peut être appréhendé d'une manière analogue :

- coûts fixes liés à l'établissement de la prairie (travail du sol, semis, semences, engrais et amendements de fond, produits divers liés à l'installation), auxquelles il faut ajouter les coûts fixes d'entretien de la prairie (main d'oeuvre de l'exploitation, coûts fixes des tracteurs et machines utilisés appartenant à l'éleveur),
- coûts variables correspondant aux intrants (engrais et amendements d'entretien, produits phytosanitaires, carburants, lubrifiants, consommables divers), à la main d'oeuvre extérieure et à la location de matériel, le cas échéant, nécessaires à l'exploitation de la prairie.

Remarques :

Dans cette étude, le coût de la production fourragère est toujours présenté à part, car il ne doit pas être systématiquement comptabilisé dans la récolte d'ensilage. En effet, les prairies sont avant tout faites pour être pâturées ; le coût des travaux de création de prairie qui incombe à l'ensilage se limite alors à celui correspondant aux travaux supplémentaires nécessaires pour rendre la parcelle récoltable mécaniquement.

D'autre part, bien souvent, l'ensilage permet de récolter un excédent fourrager qui, sans cela, aurait été gaspillé, le coût de ce fourrage est alors très limité. De plus, l'effet d'une fauche avec un matériel adapté (faucheuse à disques) à un stade approprié permet une meilleure repousse de l'herbe et donc une meilleure valorisation de la prairie.

Par contre, dans le cas de la vente de balles enrubannées, ou de la comparaison avec un élevage hors-sol (système d'élevage très peu répandu à La Réunion, avec la totalité des fourrages produits à l'extérieur de l'exploitation), le coût de la production fourragère doit être réellement pris en compte.

IV.2.3. Traitement des données

Les données sont traitées comme nous l'avons indiqué au paragraphe I.2.4. p 53 (Philippeau, 1986 ; Dervin, 1988 ; Tomassone, 1988 ; Gouet *et al.*, 1989 ; Tomassone *et al.*, 1989, 1993 ; Marija J. Norusis, 1990 ; Tranchefort *et al.*, 1991 ; Frater *et al.*, 1992 ; Kecler *et al.*, 1993).

IV.3. Temps de travaux

Fauche et conditionnement ont été réalisés avec une faucheuse à disques équipée d'un conditionneur à doigts : Kuhn FC44 en 1990 et Kuhn FC202 en 1991 (Höhn, 1988). Les temps de travaux ont été fortement diminués entre 1990 et 1991, en relation avec le changement d'équipement. Néanmoins les temps de fauche demeurent élevés (2 h ha⁻¹), à cause de la topographie et de la mauvaise aptitude du kikuyu à la fauche. Fanage, retournement d'andain et andainage sont effectués avec un faneur-andaineur Kuhn GRS25N. En 1990, quelques andainages ont été effectués avec un andaineur Kuhn GA280. Le fanage n'a pas été systématiquement réalisé. Les temps d'andainage sont aussi très élevés (1.25 h ha⁻¹).

L'épandage de mélasse sur les andains, avec une cuve adaptée, vise à compenser la pauvreté en glucides solubles des fourrages. Le pressage a été effectué avec une presse à chambre variable Rivière-Casalis RC115, et l'enrubannage avec une enrubanneuse Kverneland 7510. Les temps de pressage sont très variables et peuvent être très élevés, notamment pour le kikuyu ; ceci est principalement lié aux difficultés d'évolution de la machine en terrain pentu et à la structure stolonifère du kikuyu provoquant des bourrages dans le pick-up. Par rapport à la métropole, ces temps de travaux sont doublés (Gaillard *et al.*, 1989). Les temps d'enrubannage, élevés en raison des déplacements de l'enrubanneuse sur la parcelle, correspondent à un débit horaire de 12 balles ; en métropole, ce débit est souvent double.

Le stockage des balles enrubannées est réalisé avec un chargeur frontal, équipé si nécessaire d'une pince pour balles, un plateau complète l'équipement lorsqu'il y a transport. En 1991, le transport a été abandonné afin d'améliorer l'efficacité des chantiers ; l'éleveur reprend les balles stockées en bord de parcelle au fur et à mesure du besoin des animaux.

Une analyse des temps de travaux pour chacune des opérations de récolte et pour chacune des régions d'élevage est proposée en annexe E (pp 86-90).

Tableau 53 : Temps de travaux enregistrés en 1990 et 1991 pour l'ensemble des opérations de récolte dans les différentes régions d'élevage (photos 11, 12, 13 et 14 - p 154)

région	temps / ha (h:min)		temps / balle (min)		temps / t MS (min)	
	1990	1991	1990	1991	1990	1991
Plaine des Palmistes	7:48	5:54	45.0	21.0	179	86
Plaine des Cafres	15:57	10:15	65.0	27.4	275	146
Hauts de l'Ouest	15:28	12:49	44.0	36.6	245	231
Hauts du Sud	8:10		41.0		204	
Nombre de chantiers	21	38	21	38	18	30
Moyenne	12:47	10:00	51.0	31.0	225	171
Ecart-type	4:47	3:04	20.0	14.3	62	68



Photo 11 : La fauche



Photo 12 : L'andainage



Photo 13 : Le pressage



Photo 14 : L'enrubannage

Globalement pour l'ensemble des régions (tableau 53), on constate une réduction des temps de travaux entre 1990 et 1991 expliquée par l'utilisation de matériels plus performants, par une meilleure maîtrise de l'ensemble de la chaîne, par la suppression de l'opération de transport des balles à la ferme, par des surfaces récoltées par chantier plus grandes et par des rendements fourragers plus élevés (Dhuin, 1993). En 1990, le critère le moins variable était le temps par tonne de MS, alors qu'en 1991, c'est le temps par hectare qui s'est avéré le moins variable. Ces deux critères sont donc plus pertinents que le temps par balle pour caractériser les chantiers. Par ailleurs, le critère temps par tonne de MS est celui qui est le plus important en regard du coût d'alimentation des animaux.

En 1991, la région Plaine des Palmistes se caractérise par des temps par hectare proches des données métropolitaines : de 5 à 7 h ha⁻¹ (Gaillard *et al.*, 1989b). Les temps par balle ou par tonne de MS ont été divisés par deux entre 1990 et 1991, à cause d'un rendement fourrager faible en 1990 : 2.5 t MS ha⁻¹ et d'un rendement normal en 1991 : 4 t MS ha⁻¹ (Dhuin, 1993). Pour la Plaine des Cafres, on notera également une nette diminution des temps entre 1990 et 1991. Cette région est pénalisée par la taille des parcelles et la topographie. Les bons rendements fourragers (> 4 t MS ha⁻¹) compensent ces difficultés (Dhuin, 1993). La région Hauts de l'Ouest cumule beaucoup d'handicaps pour la mécanisation : topographie, taille des parcelles, mauvaise préparation des prairies, espèce fourragère difficile à récolter.

La région Plaine des Palmistes a atteint, dès la seconde année, des performances de chantiers intéressantes. L'amélioration pourrait porter sur l'enrubannage avec une meilleure organisation de l'approvisionnement de la machine. La région Plaine des Cafres a également pratiquement atteint l'optimum des performances de récolte. Un meilleur accès aux parcelles et une reconfiguration de certaines d'entre elles amélioreraient les chantiers de récolte. Pour les Hauts de l'Ouest, hormis une amélioration importante des parcelles à récolter par remodelage et par l'implantation d'espèces tempérées, ce qui suppose des opérations d'améliorations foncières, on peut penser que les médiocres performances enregistrées seront constantes.

Ces résultats préfigurent l'analyse des coûts et des facteurs intervenant dans le coût (chapitres suivants). On retiendra la hiérarchie des temps de travaux qui donne la hiérarchie des coûts, les coûts de mécanisation représentant près des 3/4 des coûts totaux de récolte (Paillat *et al.*, 1990). La Plaine des Palmistes possède les chantiers les plus performants et donc les coûts les moins élevés ; à l'opposé, la région Hauts de l'Ouest, avec les performances les plus faibles, présente les coûts les plus élevés

En privilégiant l'approche par tonne de MS faite en 1991, et compte tenu des estimations faites en 1992 (Lepetit, 1992a), les bases de temps de travaux suivantes peuvent être retenues pour aborder la structure des coûts selon l'organisation des chantiers présentée au chapitre suivant :

- Plaine des Palmistes : 90 min par t MS (environ 20 min par balle et 220 kg MS par balle),
- Hauts du Sud: 125 min par t MS (environ 25 min par balle et 200 kg MS par balle),
- Plaine des Cafres : 150 min par t MS (environ 30 min par balle et 200 kg MS par balle),
- Hauts de l'Ouest : 220 min par t MS (environ 35 min par balle et 160 kg MS par balle).

L'espèce fourragère récoltée et la teneur en MS à la récolte expliquent les quantités différentes de MS par balle (Paillat *et al.*, 1990 ; Lepetit, 1992a).

IV.4. Structure des coûts du stock fourrager

IV.4.1. Introduction

Le coût d'ensilage en balles enrubannées devrait être exprimé par rapport au stock d'UF et de PDI constitué. Cependant, compte tenu de la variabilité des fourrages et de leurs valeurs nutritives rencontrées à La Réunion, et compte tenu du comportement des éleveurs vis à vis du stade de récolte, il est très difficile d'adopter ce mode d'expression. Aussi, il nous a semblé bon de se limiter au coût par tonne de MS. Divisé en coûts fixes et coûts variables, et exprimé par tonne de MS, le coût de l'ensilage est composé par :

- le coût de la production fourragère,
- le coût des intrants nécessaires à la réalisation de l'ensilage,
- le coût du chantier de récolte comprenant le matériel et la main d'oeuvre.

IV.4.2. Coût de la production fourragère : création et entretien

Les coûts de création et d'entretien des prairies sont très variables selon les conditions pédoclimatiques (Pochier, 1987). Cependant, un coût moyen a été calculé (annexe E - p 91) pour une prairie renouvelée tous les cinq ans et produisant 10 t MS ha⁻¹ par an. Ce coût peut être divisé en deux parties :

- les coûts fixes correspondant à l'installation de la prairie amortissables sur la durée de son exploitation et ceux investis pour son entretien s'élèvent à 414 F par tonne de MS.
- les coûts variables d'entretien permettant la production d'herbe et correspondant à la sortie d'argent s'élèvent à 453 F par tonne de MS.

IV.4.3. Coûts des intrants consommés

A La Réunion, les consommations de film étirable (annexe E - p 92) sont identiques à celles mesurées au Cemagref (Gaillard *et al.*, 1988). Le coût est par contre supérieur compte tenu des frais d'approche (30 F par balle pour le film et la ficelle).

Concernant la composition de la mélasse, quelques analyses montrent des teneurs variables :

- analyse U.R.COOP.A. : teneur en MS = 79 %, 52 % de sucres solubles / produit brut,
- analyse U.C.A.A.B. : teneur en MS = 69 %, 42 % de sucres solubles / produit brut.

La densité est également très variable : de 1.2 à 1.6. Les apports de sucres solubles (tableau 54) ont donc été calculés avec une mélasse dont les caractéristiques moyennes sont les suivantes (Demarquilly *et al.*, 1980a) : teneurs en MS et en sucres solubles de 74 et 50 % par rapport au produit brut, respectivement, densité moyenne de 1.4. Le coût de la mélasse livrée chez l'éleveur était pour 1990 et 1991 de 0.85 F par kg brut (Paillat *et al.*, 1990 ; Lepetit, 1992).

Les données présentées sont des moyennes pondérées (tableau 54), à savoir que les apports de mélasse ont été additionnés et rapportés à l'ensemble de la production de MS fourragère, pour chacune des régions, et pour l'ensemble de l'île. Elles rendent compte de la consommation réelle de mélasse par tonne de MS. L'apport de mélasse a été très variable à cause du manque de précision de l'épandage sur andains (annexe E - pp 92-93). La Plaine des Cafres présente pour les deux années les plus grandes irrégularités d'épandage, la taille des parcelles et leur configuration pourraient en être les facteurs d'explication.

Face au manque de maîtrise de l'épandage, des abaques reliant la dose de sucres solubles nécessaire, le débit de la cuve et la vitesse d'avancement du tracteur sont proposées. L'objectif est de garantir un taux d'apport de sucres solubles suffisant pour que la fermentation soit rapide et complète (Paillat, 1994), tout en minimisant le coût (annexe E - p 93).

Tableau 54 : Apports de sucres solubles et coût moyen selon les régions en 1990 et 1991

	apport de sucres solubles (% MS)		coût (F par tonne de MS)	
	1990	1991	1990	1991
Plaine des Palmistes	11.0	8.4	188	143
Plaine des Cafres	9.1	9.3	155	157
Hauts de l'Ouest	12.6	15.3	214	260
Hauts du Sud	16.7		284	
Ensemble	11.1	10.8	188	183

IV.4.4. Coût du stock fourrager réalisé en balles enrubannées

L'intérêt de l'approche que nous voulons proposer ici est, certes de montrer les différences régionales, mais surtout de les resituer par rapport aux différentes organisations de chantiers rencontrées, notamment en regard des intervenants : éleveur ou entraide, entreprise. A partir des temps de travaux moyens, enregistrés en 1991, quatre cas caractéristiques d'organisations de chantiers ont été retenus (annexe E - p 94) :

- organisation 1 : toutes les opérations de récolte sont réalisées par l'entreprise,
- organisation 2 : l'éleveur réalise quelques opérations (épandage de mélasse, manutention et transport des balles) avec son propre matériel ou en entraide,
- organisation 3 : l'entreprise ne réalise que le pressage et l'enrubannage, toutes les autres opérations étant prises en charge par l'éleveur ou l'entraide,
- organisation 4 : toutes les opérations sont réalisées par l'éleveur ou en entraide.

Plus l'éleveur participe, plus les coûts variables diminuent au profit des coûts fixes. Globalement, le coût diminue. En effet, l'entreprise facture la main d'oeuvre à un prix supérieur à celui retenu pour les éleveurs, car elle tient compte des heures "improductives" payées au chauffeur mais non facturées. Les différences régionales restent très marquées (figure 25) (annexe E - p 94-96) en relation avec les temps de travaux et se réduisent avec une participation accrue de l'éleveur.

Peu d'exploitations des Hauts de l'Ouest sont mécanisées, elles doivent donc faire appel à l'entreprise, ce qui grève fortement la dépense en terme de trésorerie, d'autant plus que les temps de travaux sont élevés. Les exploitations de la Plaine des Palmistes et des Hauts du Sud sont toutes mécanisées. L'organisation du chantier et les conditions de récolte permettent des coûts moins élevés. A la Plaine des Cafres, toutes les organisations de chantier sont possibles selon la disponibilité en équipement et main d'oeuvre.

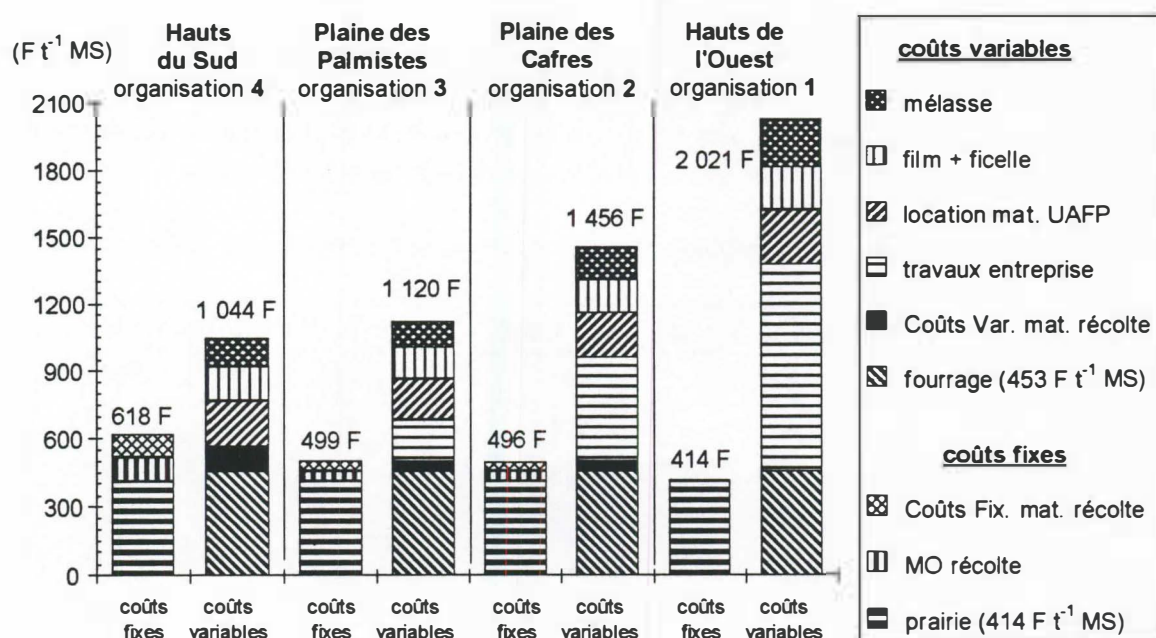


Figure 25 : Comparaisons régionales du niveau et de la structure des coûts

IV.4.5. Utilisation du matériel en commun

L'Union des A.F.P. gère les machines de récolte, subventionnées à 75 % par la Région Réunion, pour les éleveurs. Cette activité nécessite une évaluation des coûts et des conditions de rentabilité, différente de l'approche faite pour les éleveurs à travers leurs organisations de chantiers. Deux hypothèses de fonctionnement (faible ou forte utilisation) conditionnant l'amortissement du matériel peuvent être proposées (annexe E - pp 97-98).

IV.4.6. Conclusion

La structure des coûts montre que le transfert de coûts variables vers des coûts fixes et la diminution globale du coût sont les plus importants entre les organisations 2 et 3. Ce constat prêche pour une prise en charge par l'éleveur des opérations autres que celles liées à la confection de l'ensilage. Etant donné le prix d'achat élevé des machines, il semble plus réaliste que les opérations de pressage et d'enrubannage soient effectuées par l'entreprise. La constitution de groupements d'éleveurs fonctionnant en entraide, avec les équipements de fauche, fanage, andainage, épandage de mélasse, manutention et transport, paraît utile.

IV.5. Facteurs influençant le coût de l'ensilage en balles enrubannées (récolte + intrants)

IV.5.1. Introduction

A partir des premiers enregistrements de chantiers 1990, une analyse des coûts d'ensilage en balles enrubannées (Paillat *et al.*, 1990) avait montré, outre la grande dispersion des coûts, l'absence de corrélation entre le coût par tonne de MS et la teneur en MS ($r^2 = 0.3$), entre ce coût et la surface récoltée ($r^2 = 0.2$). Dès lors, avec les enregistrements de chantiers réalisés en 1990 et 1991, il a paru intéressant de tenter d'expliquer les coûts d'ensilage en prenant en compte les principaux facteurs pouvant caractériser les chantiers de récolte.

Les 39 chantiers (15 en 1990 et 24 en 1991), correspondant aux individus, sont décrits par 9 variables caractérisant les conditions de chantier (§ IV.2.1.) : mois de récolte, conditions météorologiques, stade végétatif, difficultés de mécanisation, surface, proportion d'espèces tempérées, teneur en MS, rendement fourrager et coût de l'ensilage exprimé par tonne de matière sèche (Dhuin, 1993). Trois régions sont étudiées : Hauts de l'Ouest, Plaine des Cafres et Plaine des Palmistes. Dans ce chapitre, nous présentons les principaux résultats des analyses statistiques unidimensionnelles et multidimensionnelles. Des compléments sont proposés en annexe E. Dans ces analyses, toutes les organisations de chantier, précédemment décrites, se retrouvent confondues et sont perçues à travers les régions (annexe E - pp 94-96).

IV.5.2. Facteurs explicatifs du coût

Le coût est expliqué (annexe E - tableau E20 - p 99) par l'aptitude à la mécanisation et la proportion d'espèces tempérées : $r = 0.64$ et $r = -0.47$, respectivement. La teneur en MS l'est par les conditions météorologiques : $r = -0.52$. Le stade tardif et les espèces tropicales engendrent des difficultés de mécanisation : $r = 0.54$ et $r = 0.57$, respectivement (Dhuin, 1993).

Pour les deux années 1990 et 1991, parmi les variables bien représentées dans l'analyse en composantes principales (ACP), dont l'inertie cumulée du plan 1-2 est de 57 % (Dhuin, 1993), le coût élevé est en relation avec une mécanisation difficile, un stade de récolte tardif, et est en opposition avec une proportion d'espèces tempérées importante. La teneur en MS est opposée aux mauvaises conditions météorologiques (annexe E - figure E7 - p 99).

L'analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) (figure 26) décrit les variables selon deux modalités opposées (Dhuin, 1993). La variable "coût" a été déclarée supplémentaire et n'intervient donc pas dans le positionnement des autres variables. Trois modalités sont proches du "coût élevé" : récolte avant mai, mécanisation difficile et faible proportion d'espèces tempérées. Par rapport à l'axe 1, d'autres modalités ont aussi tendance à définir les coûts élevés : teneur en MS inférieure à 30 %, stade de récolte tardif et temps pluvieux. La surface et le rendement fourrager semblent peu influencer le coût.

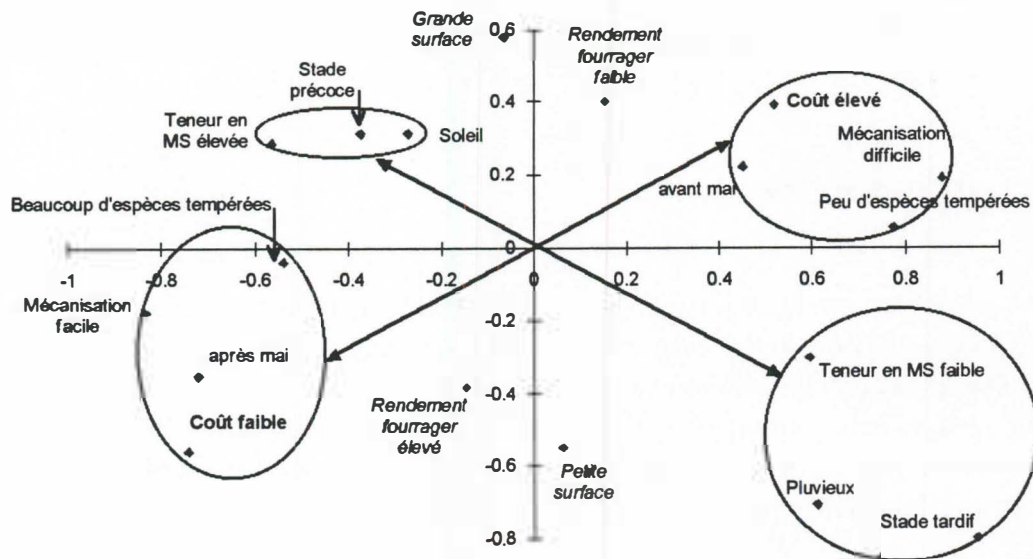


Figure 26 : Représentation des différentes conditions de chantier en 1990 et 1991, selon deux modalités opposées (AFCM)

L'analyse factorielle discriminante (AFD) (annexe E - figure E8 - p 101) permet de déterminer les variables qui influencent le plus le coût (Dhuin, 1993). Pour discriminer le coût, trois classes ont été constituées : les coûts faibles de 600 à 1000 F t⁻¹ MS, les coûts moyens de 1000 à 1300 F t⁻¹ MS et les coûts élevés de 1300 à 1700 F t⁻¹ MS. Quatre variables sont significativement discriminantes du coût : une teneur en MS élevée, associée à un rendement fourrager élevé et à une proportion importante d'espèces tempérées, à l'opposé de ces trois variables se trouvent les difficultés de mécanisation.

IV.5.3. Caractéristiques et différences régionales

Les analyses univariées présentent les caractéristiques des chantiers pour chaque région (annexe E - pp 100-101). Par rapport au profil moyen, la région Hauts de l'Ouest présente une récolte en saison des pluies, un stade tardif, des prairies difficilement mécanisables, une faible proportion d'espèces tempérées et une faible teneur en MS. Par rapport au profil moyen, la Plaine des Cafres présente des petites surfaces, une proportion d'espèces tempérées et un rendement fourrager élevés. Le profil moyen de la Plaine des Palmistes correspond à une récolte en hiver, un stade précoce, une bonne aptitude à la mécanisation, de grandes surfaces, une proportion d'espèces tempérées et une teneur en MS élevées.

L'analyse factorielle discriminante (AFD) (figure 27), représente les régions avec la répartition des chantiers. L'axe horizontal est significativement discriminant des régions (inertie de 70 %). Autour du centre de gravité des coûts supérieurs à 1300 F t⁻¹ MS, se réunissent les chantiers des Hauts de l'Ouest, seuls quelques élevages de la Plaine des Cafres et de la Plaine des Palmistes y sont présents. Le coût moyen est entouré de chantiers issus des trois régions. Par contre, le coût faible est entouré uniquement par des chantiers des Plaines. Hormis les conditions climatiques, toutes les variables discriminent les régions.

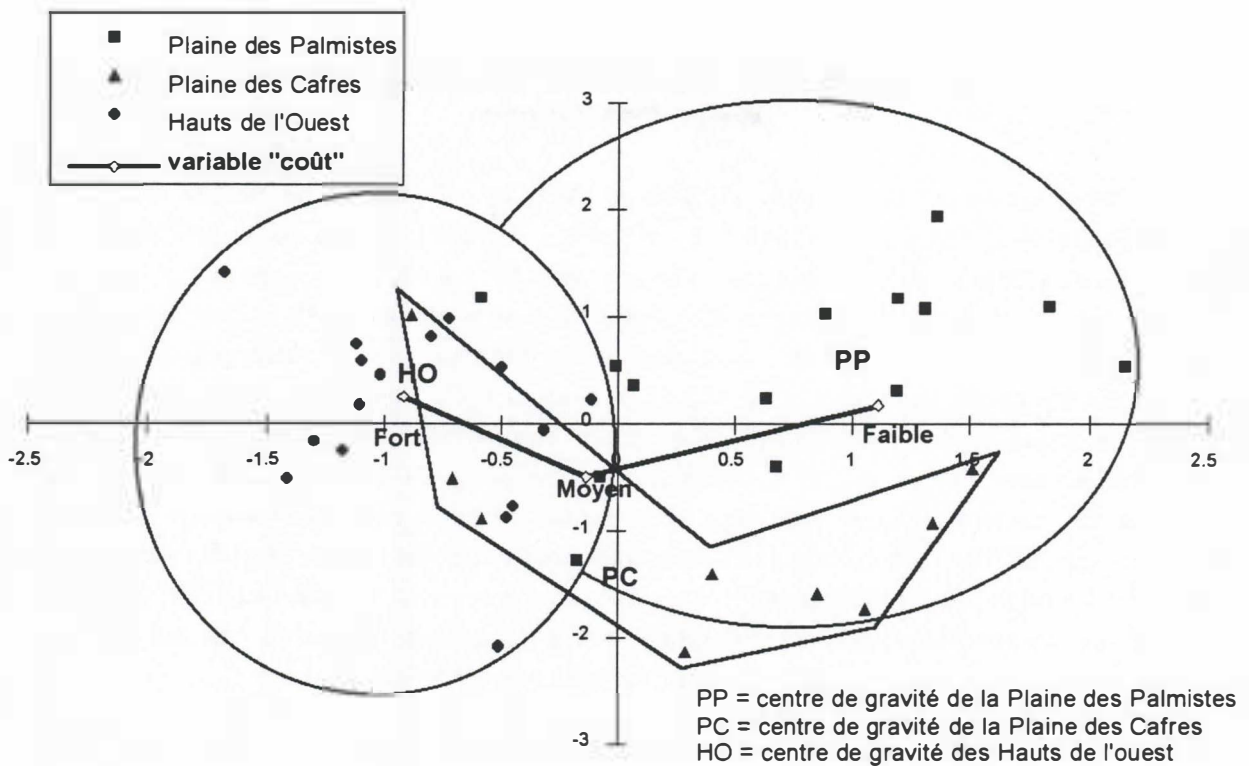


Figure 27 : Représentation des chantiers par région pour 1990 et 1991
avec positionnement de la variable coût (AFD)

IV.5.4. Conclusion

Les études statistiques descriptives précédentes montrent qu'il faut agir principalement sur l'aptitude à la mécanisation, sur la proportion d'espèces tempérées, sur la teneur en MS à la récolte et sur le rendement fourrager, pour diminuer les coûts. Les parcelles doivent être le plus mécanisable possible, des aménagements sont souhaitables notamment dans les Hauts de l'Ouest. L'implantation de graminées aptes à la récolte et se conservant bien sous forme d'ensilage doit être de règle : le kikuyu devrait être remplacé par des graminées tempérées lorsque l'éleveur prévoit un report sous forme d'ensilage. La teneur en MS doit être élevée afin d'augmenter la qualité du produit et d'en diminuer le coût. Tout en récoltant à un stade précoce, le rendement fourrager doit atteindre 3.5 à 4 t MS ha⁻¹, mais pas davantage afin de conserver une dessiccation rapide ; étant donné les coûts de récolte élevés, l'important est de stocker un fourrage de qualité, c'est à dire récolté au stade jeune, et de bien le conserver, c'est à dire avec une teneur en MS assez élevée (il faut atteindre au moins 30 % de MS). Ces recommandations devraient permettre la réalisation d'ensilage de qualité à un coût modéré, les critères de bonne qualité recourent d'ailleurs souvent les critères de coûts les plus faibles (Paillat *et al.*, 1993).

IV.6. Comparaison avec d'autres techniques de constitution de stock fourrager

Pour les Hauts de l'Ouest, en 1990 et 1991, le coût moyen de récolte en balles enrubannées (tableau 55) était de 1332 F t⁻¹ MS. Pour cette région, les balles enrubannées présentent des coûts inférieurs à l'ensilage avec une récolteuse à fléaux (annexe E - p 102). En 1990, pour les Hauts du Sud, les coûts d'ensilage en balles enrubannées étaient de 930 et 1172 F t⁻¹ MS (Paillat *et al.*, 1990) ; ils étaient donc inférieurs aux coûts enregistrés avec l'ensileuse double coupe (annexe E - pp 102-103). Pour la Plaine des Cafres et la Plaine des Palmistes, les mesures des coûts d'ensilage en balles enrubannées, réalisés par les adhérents de la C.U.M.A. des Plaines en 1991, donnent une moyenne de 716 F t⁻¹ MS, ce qui est comparable aux coûts d'ensilage avec l'ensileuse double coupe et avec l'ensileuse à couteaux (annexe E - pp 103-104). La comparaison des coûts des différentes techniques de récolte en ensilage montre donc peu de différences lorsque ces techniques sont évaluées dans un contexte semblable. La comparaison avec la métropole est plus délicate, dans la mesure où les conditions et le contexte économique de production sont très différents.

Tableau 55 : Caractéristiques moyennes et coûts moyens de chantiers d'ensilage réalisés avec différentes techniques dans plusieurs régions (1987 - 1993)

matériel utilisé	région	teneur moyenne en MS (%)	rendement (t MS ha ⁻¹)	coût de récolte + intrants	
				(F ha ⁻¹)	(F t ⁻¹ MS)
RHC à fléaux	HO	19	2.9	4432	1524
balles enrubannées	HO	25	3.4	4529	1332
RHC double coupe	HS	15	2.1	3402	1588
balles enrubannées	HS	35	2.4	2522	1051
RHC double coupe	PC et PP	17	3.1	2147	685
RHC à couteaux	PC et PP	25	3.3	2448	739
balles enrubannées	PC et PP	35	3.6	2578	716

RHC = Récolteuse Hacheuse Chargeuse

HO = Hauts de l'Ouest, HS = Hauts du Sud, PC = Plaine des Cafres, PP = Plaine des Palmistes

La fenaison est difficile à conduire dans les Hauts à cause des mauvaises conditions météorologiques. La production de foin de *Chloris gayana* est par contre possible sur la ceinture littorale. Ce foin est utilisé par de nombreux éleveurs pour alimenter les animaux en période de déficit fourrager. Il est donc intéressant de situer le coût de ce fourrage par rapport aux balles enrubannées récoltées sur l'exploitation. Le prix moyen du foin se situe à 1.50 F kg⁻¹, correspondant à un coût de 3.40 F par UFL. Sur ces bases (annexe E - pp 104-105), un coût équivalent d'ensilage de valeur moyenne, bien conservé, se situerait à 2400 F t⁻¹ MS. Un tel coût n'a jamais été enregistré, quelle que soit la technique d'ensilage. Vu son coût élevé et sa valeur alimentaire faible, le foin doit être utilisé à bon escient, il ne peut intervenir qu'en complément de la production fourragère des Hauts.

IV.7. Conclusion

Le calcul des coûts de revient par la méthode I.G.E.R. - B.C.M.E.A. permet de comparer les données entre elles, de mettre en évidence des facteurs de variation, et de situer cette technique d'ensilage par rapport à d'autres. Elle n'a pas pour but de déterminer les coûts réels pour l'éleveur, qui sont toujours très difficiles à obtenir et surtout très variables en fonction des conditions d'élevage rencontrées. En parallèle, la structure des coûts, permet de mieux différencier les coûts fixes et variables (directement imputables à l'opération de récolte).

Les temps de travaux, à la base du calcul des coûts, sont très variables à La Réunion. Ils permettent d'appréhender les conditions d'ensilage vers lesquelles il serait nécessaire de tendre, dans la limite des contraintes édaphiques. Les performances de chantier se sont nettement améliorées entre 1990 (année expérimentale) et 1991 ; les temps de travaux sont ensuite restés stables pour 1992. Certaines régions, et spécialement les Hauts de l'Ouest, sont pénalisées par les conditions de récolte, mais ces conditions peuvent être améliorées. La Plaine des Palmistes et certaines parcelles de la Plaine des Cafres ont, par contre, des conditions de récolte qui se rapprochent des conditions métropolitaines.

L'approche de la structure des coûts a permis de tester diverses hypothèses d'organisation de chantier, dans les différentes régions. Elle met en évidence les différents postes de coûts (production fourragère, récolte, intrants), en différenciant leur nature. Avec l'augmentation de la demande, l'Union des A.F.P. doit maintenant proposer des systèmes de groupements, associés avec un travail d'entreprise, afin de mieux maîtriser les coûts et de répondre à temps aux besoins, pour une exploitation des fourrages au meilleur stade végétatif.

D'après les analyses multivariées, difficultés de mécanisation (pentes, configuration des parcelles, structure stolonifère), espèce fourragère, teneur en MS et rendement fourrager sont les facteurs qui influencent le plus les coûts. Ces paramètres doivent être maîtrisés au mieux pour les diminuer. Grâce à trois années de suivi de chantiers d'ensilage en balles enrubannées, les références techniques et économiques acquises permettent donc de formuler des recommandations (aménagement des parcelles, implantation de graminées tempérées, récolte à un stade jeune, maîtrise du rendement fourrager ...).

Enfin, on relève de faibles différences de coûts par rapport aux autres techniques d'ensilage évaluées dans un contexte comparable. A La Réunion, l'ensilage est une technique coûteuse mais nécessaire, qui mérite de ce fait, beaucoup d'attention de la part des éleveurs et des techniciens. Pour resituer l'ensilage en balles enrubannées dans le système fourrager, le pâturage, lorsqu'il est possible, reste le moyen le plus économique d'exploiter les fourrages, l'ensilage permettant alors une intensification raisonnée de certaines parcelles de l'exploitation. Certains fourrages comme le kikuyu, notamment, ont pour vocation essentielle le pâturage. Les graminées tempérées peuvent être ciblées vers l'ensilage. D'autre part, la complémentarité par rapport au foin, produit dans les bas, doit être davantage mise en avant par les organismes de développement, pour éviter un désengagement injustifié des éleveurs pour l'exploitation de l'herbe produite dans les Hauts. Le foin, vu son coût élevé et sa valeur alimentaire faible, doit être utilisé à bon escient, principalement pour des rations déséquilibrées en matières sèches.

CONCLUSION GENERALE

1. Rappel des objectifs

Les objectifs de ce travail étaient :

- l'analyse des facteurs intervenant dans la conservation des ensilages en balles enrubannées en étudiant particulièrement les conditions de réalisation des ensilages à La Réunion,
- l'analyse des conditions économiques de développement de cette technique dans le contexte d'élevage des Hauts de l'île, en privilégiant une approche régionale.

En liaison étroite avec les objectifs de développement affichés par l'Union des A.F.P., gestionnaire des fonds alloués par la Région Réunion pour l'amélioration de la production fourragère, nos activités de recherche se sont intéressées à l'ensemble du procédé d'ensilage en balles enrubannées et à ses implications dans les élevages réunionnais. Les mesures et expérimentations ont été effectuées principalement chez les éleveurs.

La démarche méthodologique employée s'est attachée dans un premier temps à connaître les conditions de réalisation des ensilages en balles enrubannées :

- caractéristiques des fourrages et aptitude à l'ensilage,
- caractérisation climatique des régions et conditions de dessiccation des fourrages,
- étanchéité de l'enrubannage,
- résistance des films en conditions d'exposition tropicale.

La seconde phase de ce travail a concerné l'évaluation de la technique d'ensilage en balles enrubannées, incluant une comparaison avec d'autres techniques :

- qualité de conservation des ensilages réalisés et processus fermentaires,
- temps de travaux et coût de revient dans les différentes régions d'élevage de l'île.

Cette démarche par thème détermine les résultats, dont nous résumons ici les principaux ; leur analyse plus complète a fait l'objet de conclusions dans chacun des chapitres.

2. Conditions de réalisation des balles enrubannées

2.1. Aptitude du fourrage à l'ensilage

Les différences climatiques liées aux régions, à l'altitude et à la saison sont, avec le stade de végétation, à l'origine de variations importantes dans la composition chimique des fourrages produits. Des études complémentaires seront nécessaires pour mieux les connaître.

Concernant plus directement l'aptitude à l'ensilage, la teneur en glucides solubles est très faible sauf au printemps, période plus ensoleillée. Un apport de mélasse de canne à sucre, facilement disponible à La Réunion, est donc nécessaire pour tous les fourrages, y compris les ray-grass. Cet apport peut cependant être modulé selon la saison, la teneur en MS et l'espèce fourragère. Par contre, la résistance à l'acidification des fourrages, mesurée par le pouvoir tampon, est souvent faible.

Conclusion générale

Etant donné les teneurs en MS très faibles de l'herbe à la fauche, un ressuyage, voire un préfanage, est indispensable pour ensiler correctement ces fourrages. En cas d'impossibilité de ressuyer suffisamment le fourrage, un apport de conservateur efficace (acide formique - formol) est recommandé.

2.2. Dessiccation du fourrage

L'amélioration des conditions de dessiccation est déterminante pour la qualité de conservation des ensilages en balles enrubannées, ainsi que pour la réduction du coût de revient de cet ensilage. Globalement, il faut maîtriser le rendement fourrager et le stade et raisonner les interventions mécanisées (hauteur de fauche, densité, fanage et retournement des andains) selon la région, l'espèce fourragère et le rendement fourrager. L'espèce fourragère conditionne la dessiccation ; les graminées tempérées se séchent beaucoup mieux ; c'est le cas notamment de la fétuque qui devrait être davantage utilisée par les éleveurs.

Tributaire des conditions climatiques contraignantes, le séchage doit être optimisé pour chacune des régions. Les faibles déficits de saturation enregistrés et l'espèce fourragère récoltée (kikuyu) dans les Hauts de l'Ouest obligent à conduire la dessiccation sur plusieurs jours avec des retournements d'andains le matin sur sol ressuyé. La fauche doit être suffisamment haute. A la Plaine des Palmistes, avec une fauche effectuée la veille, le fanage peut s'avérer utile tôt le matin, la dessiccation se poursuivant l'après-midi après regroupement en andains larges et aérés. A la Plaine des Cafres, la durée d'insolation étant plus importante, plusieurs fanages en cours de journée peuvent être réalisés, notamment si le rendement fourrager est élevé.

2.3. Etanchéité de l'enrubannage

Les mesures d'étanchéité des films étirables, mises au point par le CEMAGREF et basées sur la mise en pression d'une balle témoin avec des débits d'air contrôlés, permettent de caractériser et de comparer les films. Des améliorations sont possibles pour mieux quantifier cette étanchéité en maîtrisant davantage les conditions expérimentales :

- l'utilisation d'une enceinte avec conditions atmosphériques contrôlées est préférable,
- la prise en compte de plusieurs différences de pression obtenues avec différents débits d'air (de 0.3 à 3 l min⁻¹) dans la balle témoin permet d'augmenter la précision du test,
- un délai, qui reste à définir, entre enrubannage et test doit permettre de quantifier l'augmentation ou la diminution de l'effet collant durant la période de conservation.

2.4. Résistance des films étirables en conditions tropicales

Les conditions d'ensoleillement et de rayonnement, notamment U.V., sont plus sévères sous climat tropical. Les expositions des films dans des situations contrastées (CEMAGREF à 300 m d'altitude, tropical à 170 m, tropical d'altitude à 1500 m) ont permis de sélectionner des films aptes aux conditions tropicales et de tenter d'expliquer l'influence de la couleur du film sur sa longévité constatée.

Parmi les films testés, le film noir tri-couches repéré par D est celui qui présente les meilleures caractéristiques de résistance et d'étanchéité à long terme.

La durée de vie sur la balle témoin, proposée par le CEMAGREF, est une méthode adaptée pour caractériser la résistance des films, mais elle nécessite une exposition sur une longue période. Des méthodes de laboratoire, telles que celles proposées par le L.N.E., sont à rechercher pour réduire cette contrainte (enceinte climatique, balle témoin en modèle réduit ...).

3. Evaluation de l'ensilage en balles enrubannées

3.1. Conservation des ensilages

Les ensilages en balles enrubannées sont mieux conservés lorsque la teneur en MS est élevée, avec des espèces tempérées récoltées dans de bonnes conditions (mécanisation facile et conditions climatiques favorables). La teneur en MS est elle même dépendante des conditions météorologiques, des caractéristiques du fourrage (espèce, stade, teneur en MAT, rendement fourrager) et des conditions de mécanisation.

Grâce aux résultats des enquêtes de conservation, nous avons pu retenir trois teneurs en MS qui définissent quatre classes de conservation des ensilages en balles enrubannées : les ensilages mauvais ($MS < 22\%$), médiocres à moyens ($22\% < MS < 27\%$), moyens à bons ($27\% < MS < 40\%$) et excellents ($MS > 40\%$). Les graminées tempérées s'ensilent correctement en balles enrubannées si la teneur en MS est suffisante, c'est à dire supérieure à 27 %. Par contre, le kikuyu s'ensile mal car ses tiges et stolons sont difficiles à sécher, d'où des différences de teneur en MS à l'intérieur des balles qui favorisent les fermentations butyriques. Il faut atteindre au moins 40 % de MS pour que l'ensilage de kikuyu en balles enrubannées soit correctement conservé.

L'apport de mélasse permet de compenser la pauvreté en glucides solubles des fourrages, mais cet apport n'est vraiment déterminant que pour une teneur en MS supérieure à 27 % pour les graminées tempérées et 40 % pour le kikuyu. De même, l'action du conservateur biologique Caylasil® (ferments lactiques + enzymes) est synergique de l'apport de sucres solubles si la teneur en MS est suffisante. Par contre, les essais d'acidification du fourrage, récolté en brins entiers, par un sel d'acide formique (tetraformiate d'ammonium) n'a pas donné satisfaction. Son action inhibitrice de la flore lactique a conduit à des ensilages mal conservés et instables (pH élevé).

Dans nos essais, la couleur du film étirable n'est pas apparue comme un facteur déterminant de la conservation des balles enrubannées.

Enfin, comparée aux autres techniques d'ensilages utilisées à La Réunion (coupe directe avec des ensileuses à fléaux ou double coupe, ou ressuyé en coupe fine), la technique d'ensilage en balles enrubannées a permis, notamment grâce à un ressuyage plus important, d'améliorer très nettement la qualité de conservation des ensilages d'herbe.

3.2. Coût de revient

En raison de conditions de récolte très différentes (espèce fourragère, difficultés de séchage et d'évolution des machines) les temps de récolte et les coûts sont très variables et différencient nettement les régions. La région Plaine des Palmistes présente des performances proches de celles rencontrées en métropole. Les performances peuvent être améliorées à la Plaine des Cafres en maîtrisant mieux le stade de récolte et le rendement fourrager. Par contre, des améliorations foncières et l'implantation de graminées aptes à la fauche, notamment la fétuque qui se sèche plus facilement, seront nécessaires dans les Hauts de l'Ouest.

La mise en évidence des postes de coûts permet d'orienter l'organisation des chantiers d'ensilage en balles enrubannées vers la maîtrise par les éleveurs de la première phase du chantier, à savoir, fauche, fanage, andainage et épandage de mélasse, ainsi que la manutention des balles, le pressage et l'enrubannage étant assuré par un travail d'entreprise.

Enfin, les coûts, évalués dans des situations comparables, sont presque identiques entre les différentes techniques d'ensilage utilisées à La Réunion. Comparé au foin de *Chloris gayana* produit sur la ceinture littorale, l'ensilage d'herbe permet une valorisation à un coût satisfaisant des fourrages de bonne valeur nutritive produits dans les Hauts de l'île.

4. Critique des méthodes

La méthodologie de caractérisation de l'étanchéité de l'enrubannage a pu être affinée au cours de cette étude :

- les capteurs sont plus précis et la centrale d'acquisition permet d'automatiser la prise de données et d'accroître le nombre d'enregistrements,
- l'influence des conditions atmosphériques sur les mesures a été modélisée,
- les conditions des tests caractérisant l'étanchéité ont pu être mieux cernées (nombre de couches de film, faces bombées, effet collant, dynamique de montée en pression).

Cependant, bien que les échanges gazeux intervenant dans les balles enrubannées soient mieux connus, il ne nous a pas été possible de quantifier, par l'enregistrement des pressions en cours du processus fermentaire de l'ensilage et la caractérisation de l'étanchéité de l'emballage, les volumes et masses de gaz provenant des fermentations. Les suivis de pH donnent davantage d'indications, mais ne prennent pas en compte la variabilité à l'intérieur des balles qui semble être un facteur important de la dégradation ultérieure de l'ensilage par prolifération de la flore butyrique dans les endroits où la teneur en MS est plus faible.

Travaillant chez les éleveurs et malgré leur bonne volonté et l'aide précieuse des techniciens (Union des A.F.P., E.D.E., S.I.C.A. - Lait), les essais se sont avérés parfois difficiles à mettre en place, car les contraintes du chantier (matériel disponible, entrepreneur de travaux, conditions climatiques) ont pris le pas sur les contraintes de l'expérimentation. Cependant, les résultats obtenus lors de ces essais ont permis de compléter les résultats provenant des enquêtes effectuées dans les élevages durant les deux premières années de suivi.

Les notations synthétiques, qui simplifient l'interprétation des caractéristiques fermentaires des ensilages, ont été très utiles dans l'analyse des résultats très variables de ces enquêtes. Cependant, ces notations étant globales, l'analyse des caractéristiques fermentaires permet une meilleure compréhension des processus intervenant dans les fermentations.

5. Problèmes de recherche soulevés

Dans le cadre de la certification des films étirables, le suivi d'étanchéité durant la période d'exposition est essentiel. La mise au point d'une méthode de caractérisation de la résistance des films, permettant de réduire le plus possible la durée des essais, s'avère nécessaire. De même, la mise en relation de l'étanchéité des balles enrubannées avec les fermentations et la qualité de conservation mériterait la mise au point d'une méthode permettant de déterminer les niveaux d'étanchéité nécessaires à une bonne conservation du fourrage, selon la teneur en MS de celui-ci.

Dans les balles enrubannées, constituées par du fourrage en brins longs ou entiers, il semble que les processus fermentaires soient assez différents de ceux rencontrés dans les ensilages réalisés en brins courts dans des silos, notamment par les teneurs plus élevées en ammoniac et acide butyrique, et plus faibles en acide acétique. Le rôle de certains micro-organismes (levures, bactéries anaérobies facultatives, bactéries lactiques) dans les premières phases de fermentation pourrait constituer un thème d'étude à développer sur fourrages tempérés, mais aussi tropicaux.

La technique d'ensilage en balles enrubannées tend à se développer en milieu tropical, car le préfanage permet d'améliorer la conservation des fourrages tropicaux difficiles à ensiler avec les autres techniques. Les études sur ces fourrages dans les départements et territoires d'outre-mer semblent utiles à promouvoir (Nouvelle-Calédonie, Martinique, Guadeloupe, Réunion). Un réseau d'échanges devrait pouvoir s'établir (I.N.R.A., CEMAGREF, C.I.R.A.D.).

A La Réunion, des essais d'acidification avec un conservateur efficace (acide formique - formol) seraient nécessaires pour mieux conserver les ensilages réalisés sous conditions climatiques difficiles, ce qui est fréquemment le cas en période cyclonique. De même, avec l'achat récent de presses hacheuses, il serait intéressant d'évaluer l'amélioration de la conservation que doit permettre le hachage (Demarquilly, 1993 ; Gaillard, 1993 ; Corrot, 1994).

D'autre part, à partir des résultats repris dans divers travaux réalisés à La Réunion sur les fourrages, il s'avère que la composition chimique et les valeurs nutritives des fourrages, et surtout leurs variations sont mal connues. Il importe donc pour la cellule élevage du C.I.R.A.D. de mettre en place un dispositif d'acquisition de références sur les fourrages, intégrant les variations liées au fourrage, à la saison, à l'altitude et au climat.

6. Développement de la technique d'ensilage en balles enrubannées à La Réunion

L'ensilage en balles enrubannées est effectivement une solution au problème posé, à savoir résoudre le déficit fourrager hivernal. En effet, depuis 1990, les quantités de fourrage mises en réserve sont croissantes (plus de 600 ha, soit environ 2400 t de MS en 1994), principalement grâce au développement de cette technique (près de 300 ha, soit environ 1200 t de MS). En 1995, chacune des régions d'élevage devrait être équipée d'une chaîne complète. Les presses achetées en 1990 et 1992 seront également renouvelées (Union des A.F.P., 1995). De plus, plusieurs groupements d'éleveurs font des projets d'acquisition de faucheuses, andaineurs et cuves à mélasse. Ces nouveaux équipements devraient augmenter la disponibilité en matériel et faciliter l'organisation des chantiers.

Cependant, les éleveurs ont toujours tendance à accroître la charge animale sur la surface fourragère, ce qui, malgré les efforts consentis en matière de stockage de fourrages, perpétue les problèmes de déficit fourrager en période de sécheresse prolongée (la période de fin 1994 - début 1995 en est un exemple) et le recours à la bagasse de canne à sucre. Des efforts pour une meilleure gestion des surfaces fourragères sont nécessaires. Un travail de vulgarisation associant le C.I.R.A.D., l'Union des A.F.P. et l'E.D.E. est en cours sur ce thème.

A ce propos, l'utilisation de fourrage sous forme de balles enrubannées présente un intérêt formateur pour les éleveurs. En effet, cette technique permet à l'éleveur de mieux gérer le stade de récolte, même pour des petites parcelles, alors que la pousse de l'herbe en saison des pluies est difficile à maîtriser avec le seul pâturage, et que les techniques d'ensilages en silo nécessitent des parcelles suffisamment grandes ou nombreuses, les fourrages présentant souvent des stades très divers. De plus, l'éleveur peut sélectionner les balles en fonction de la qualité du fourrage sur le plan de la valeur nutritive, au vu du stade de récolte, et en fonction de la qualité de conservation présumée, au vu du séchage réalisé. Cette sélection lui permet de nourrir au mieux son troupeau en fonction des types d'animaux, de leur stade physiologique et de la qualité des pâturages proposés.

Pour les grands troupeaux, l'ensilage en balles enrubannées individuellement est complémentaire des autres techniques d'ensilages, car il permet d'ajuster l'offre de fourrage aux besoins des animaux, les silos étant ouverts seulement dans les périodes de déficit fourrager important. Les ensilages en silos devront cependant être beaucoup mieux réalisés (ressuyage suffisant, durée de confection réduite, qualité de fermeture), afin d'améliorer la qualité de conservation qui s'est avérée très médiocre en 1994.

Les itinéraires techniques pour réaliser correctement l'ensilage en balles enrubannées sont maintenant connus. Cependant, des progrès sont encore nécessaires, notamment dans les Hauts de l'Ouest, en matière d'amélioration des conditions de mécanisation, de choix des espèces fourragères pour l'ensilage, de maîtrise du stade de récolte et du rendement fourrager, d'amélioration de la dessiccation.

BIBLIOGRAPHIE

- A.C.T.A., 1987. *Dactyle*. Fiche n° 405, Association de Coordination Technique Agricole, Paris, 2 p.
- A.C.T.A., 1987. *Fétuque élevée*. Fiche n° 406, Association de Coordination Technique Agricole, Paris, 2 p.
- A.C.T.A., 1987. *Ray-grass anglais*. Fiche n° 410, Association de Coordination Technique Agricole, Paris, 2 p.
- A.C.T.A., 1987. *Ray-grass d'Italie*. Fiche n° 409, Association de Coordination Technique Agricole, Paris, 2 p.
- A.C.T.A., 1987. *Ray-grass hybride*. Fiche n° 413, Association de Coordination Technique Agricole, Paris, 2 p.
- A.C.T.A., 1988. *Bromes*. Fiche n° 414, Association de Coordination Technique Agricole, Paris, 2 p.
- AFNOR, 1980. *Plastiques - Méthodes d'exposition aux intempéries - N.F. T 51-165*. Association Française de Normalisation, Paris, 11 p.
- Agreste, 1990. *Recensement agricole 1988-1989 - Réunion - Principaux résultats*. Analyses et études, Ministère de l'Agriculture et de la Forêt, 28 p.
- Agreste, 1993. *Annuaire de statistiques agricoles - Réunion - Année 1993*. Données, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 60 p.
- Andrieu J.-P., Demarquilly C., 1987. *Valeur nutritive des fourrages : tables et prévisions*. In : Bulletin Technique C.R.Z.V. Theix, Institut National de la Recherche Agronomique, Ceyrat, (70), pp 61-73.
- Andrieu J.-P., Demarquilly C., Belard D., 1986. *Composition, aptitude à l'ensilage et valeur nutritive des prairies naturelles du cantal destinées à l'ensilage*. In : Forum Fourrage Auvergne 86, Comité d'animation Fourrages Mieux Chataigneraie, Maurs, pp 199-208.
- Andrieu J.-P., Demarquilly C., Rouel J., 1990. *Conservation et valeur alimentaire des ensilages directs de prairies naturelles - Comparaisons de trois types de conservateurs*. In : Productions Animales, Institut National de la Recherche Agronomique, février, 3 (1), pp 67-73.
- Andrieu J.-P., Demarquilly C., Rouel J., 1992. *Conservation et utilisation par les génisses de l'herbe de prairies naturelles - Intérêt des balles rondes enrubannées comparativement à l'ensilage direct et au foin*. In : Productions Animales, Institut National de la Recherche Agronomique, juillet, 5 (3), pp 205-212.
- Aufrère J., Michalet-Doreau B., 1988. *Comparison of methods for predicting digestibility of feeds*. In : Animal Feed Science and Technology, 20, pp 203-218.
- Bates D.B., Kunkle W.E., Chambliss C.G., Cromwell R.P., 1989. *Effect of dry matter and additives on Bermudagrass and Rhizoma Peanut round bales silage*. In : Journal of Prod. Agric., Gainesville, vol. 2, n°1, pp 91-96.
- Bigot A., 1985. *Approche de l'étude et de l'amélioration des systèmes fourragers à La Réunion*. Documents de travail internes, I.E.M.V.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Pierre de La Réunion.

Bibliographie

Bigot A., 1991. *Cinétique de la productivité et de la valeur alimentaire du kikuyu en fonction de la saison dans les Hauts de Montvert*. Synthèses et Etudes Spécifiques, C.I.R.A.D. - Elevage, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Pierre de La Réunion, 10 p.

Bigot A., Fontaine O., 1991. *Prairies pour les Hauts de l'Ouest*. Synthèses et Etudes Spécifiques, C.I.R.A.D. - Elevage, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, St Pierre de La Réunion, 20 p.

Brady C.J., 1960. *Redistribution of nitrogen in grass and leguminous fodder plants during wilting and ensilage*. In : Journal of Science and Food Agricultural, Victoria, vol. 11, may, pp 276-284.

Bridier B., 1981. *L'élevage bovin réunionnais - Des systèmes de production à dominante élevage bovin dans les Hauts de l'île - Notes et réflexions*. Chambre d'Agriculture, S^t Denis de La Réunion, 170 p.

Brooks Instrument Rosemount, 1988. *Manuel d'instructions F.X. 5850 E - Débitmètre régulateur massique modèle 5850 E*. Serv'Instrumentation, Irigny, 52 p.

Brunschwig Ph., 1988a. *Ensilages d'herbe pour bovins à La Réunion - Premières observations pour 1987 et 1988*. Note technique, C.I.R.A.D. - Elevage, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Pierre de La Réunion, 12 p.

Brunschwig Ph., 1988b. *Ensilages d'herbe pour bovins à La Réunion : des solutions pour progresser*. Note technique, C.I.R.A.D. - Elevage, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Pierre de La Réunion, 4 p.

Brunschwig Ph., 1989. *Tableaux de la valeur alimentaire des fourrages : choix des équations*. Note technique, Etablissement Départemental de l'Elevage, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, St Pierre de La Réunion, 16 p.

Brunschwig Ph., 1990. *Chantiers et conservation d'ensilage d'herbe en balles rondes enrubannées* - Protocole technique, C.I.R.A.D. - Elevage, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Pierre de La Réunion, 11 p.

Brunschwig Ph., 1991. *Le foin de Chloris gayana à La Réunion*. Synthèses et Etudes Spécifiques, C.I.R.A.D. - Elevage, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Pierre de La Réunion, 23 p.

Cabon G., 1979. *Les facteurs de variation de la qualité de conservation des ensilages*. In : La conservation des ensilages, Cycle Approfondi d'Alimentation Animale, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, pp 78-92.

Cabon G., 1984. *Echantillonnage, au champ, d'herbe en andains*. Fiche Fourrages 05030, Institut Technique des Céréales et Fourrages, Paris, 4 p.

Cabon G., 1987. *Accélérer la dessiccation du fourrage - 15 ans d'évolution des matériels et des méthodes*. In : Les fourrages secs : récolte, traitement, utilisation, C. Demarquilly Ed., Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, pp 47-62.

Cairol D., Jannot Ph., 1990. *De la réduction des charges de mécanisation à l'augmentation de la productivité des matériels dans l'exploitation agricole*. Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Antony, 63 p + annexes.

Casagrande J.-R., 1991. *La modélisation de la récolte des fourrages : cas du foin en grosses balles cylindriques*. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montoldre, 163 p + annexes.

Cedra C., 1995. *Les matériels de récolte des fourrages, ensilage et distribution*. CEMAGREF Ed., Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Antony.

Cedra C., Parfait G., Gaillard F., 1989. *Informations techniques et matériels - Ensilage en balles rondes : le CEMAGREF a organisé une démonstration à Montoldre*. In : Bulletin Technique du Machinisme et des Equipements Agricoles, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Antony, n° 41, juillet-août, pp 3-10.

Célanie E., 1982. *Etude de l'évolution microbiologique et des caractéristiques fermentaires des ensilages de canne à sucre, de sorgho et de pangola en climat tropical humide*. Thèse de Docteur 3^{ème} cycle présentée à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 142 p + annexes.

Chamayou H., 1984. *Notion de bioclimatologie*. Cours dispensé à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 191 p.

Ciotti A., Canale A., Valente M.-E., Peiretti P.-G., 1989. *Direct and delayed sealing of round bales of lucerne at low degrees of wilting*. In : Proceedings of the XVI International Grassland Congress, Nice, pp 971-972.

C.N.E.R.N.A., 1986. *Recommandations pour l'estimation de la contamination du lait en spores de clostridia, par la méthode de culture en milieu liquide*. In : La Revue Laitière moderne, Centre National de Coordination des Etudes et Recherches sur la Nutrition et l'Alimentation, Paris, n° 451, avril, pp 1-8.

Cornet M., 1977. *Le préfanage mécanique*. In : Perspectives Agricoles, Institut Technique des Céréales et Fourrages, Paris, n°4, avril, pp 46-59.

Corrot G., 1991. *Mise au point d'une méthode de détermination du taux de matière sèche des fourrages avec un four à micro-ondes - Essai 91075*. In : Convention de recherche M.R.E. 90 G 0766, Institut de l'Elevage, Paris, 20 p + annexes.

Corrot G., 1993. *Place de l'enrubannage dans le système d'alimentation et qualité de conservation*. In : Entre foin et ensilage - L'enrubannage, Institut de l'Elevage, Paris, pp 6-18.

Corrot G., 1994. *Enrubannage et conservation - Actualisation des références - Observations sur les nouveaux matériels*. Compte Rendu n° 94086, Institut de l'Elevage, Paris, 19 p.

Corrot G., Delacroix J., 1991. *Balles rondes enrubannées - Contamination en spores butyriques et qualité de conservation du fourrage (1^{ère} partie)*. In : Convention de recherche M.R.E. 90 G 0766, Institut de l'Elevage, Paris, 37 p + annexes.

Cotto, 1982. *Qualité de conservation - Résultats d'enquête EDE sur 10 départements*. In : Les nouvelles techniques d'ensilage d'herbe : autochargeuse - balles rondes, Journée d'information

Bibliographie

- du 27 avril, I.T.E.B., I.N.R.A., I.T.C.F., E.D.E. - S.U.A.D. Finistère, CEMAGREF, B.C.M.E.A., Paris, pp 59-78.
- Courtin M.G., Spoelstra S.F., 1990. *A simulation model of the microbiological and chemical changes accompanying the initial stage of aerobic deterioration of silage*. In : Grass and Forage Science, Lelystad, vol. 45, p 153-165.
- Cultivar, 1988. *Additifs et agents d'ensilage*. In : Cultivar 2000 Elevage, n° 229, avril, pp 34-37.
- Daponte T., 1991. *The importance of pin-holes in silage films and how to measure them*. In : Proceedings of the XI International Congress on the Use of Plastics in Agriculture, Maison des Industries Plastiques, Paris, pp D49-D57.
- Daponte T., 1992. *Les films coextrudés dans l'ensilage*. In : Plasticulture, n° 96-4, pp 35-44.
- De Figueiredo M., Marais J.-P., 1994. *The effect of bacterial inoculants on kikuyu silage quality*. In : Journal of Agricultural Science, Cambridge, 122, pp 53-60.
- De Figueiredo V., Do Céu M., 1989. *Factors affecting the quality of Pennisetum clandestinum (kikuyu grass) silage*. In : Dissertation Abstracts International, vol. 50, n° 3, september, p 818-B.
- Delacroix J., Corrot G., 1992. *Balles enrubannées - Contamination en spores butyriques et qualité de conservation du fourrage (2^{ème} partie)*. In : Convention de recherche M.R.E. 90 G 0766, Institut de l'Elevage, Paris, 37 p + annexes.
- Demarne F.-E., 1992. *Dosage des acides gras volatils et des alcools dans les ensilages*. Note technique, I.R.A.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement., 7 p.
- Demarquilly C., 1979a. *Les paramètres physico-chimiques de l'ensilage*. In : La conservation des ensilages, Cycle Approfondi d'Alimentation Animale, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, pp 1-17.
- Demarquilly C., 1979b. *Classification des conservateurs actuels, évolution à venir probable*. In : La conservation des ensilages, Cycle Approfondi d'Alimentation Animale, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, pp 100-110.
- Demarquilly C., 1986. *L'ensilage et l'évolution récente des conservateurs*. In : Bulletin Technique C.R.Z.V. Theix, Institut National de la Recherche Agronomique, Ceyrat, (63), pp 5-12.
- Demarquilly C., 1987. *La fénaison : évolution de la plante au champ entre la fauche et la récolte, perte d'eau, métabolisme, modifications de la composition morphologique et chimique*. In : Les fourrages secs : récolte, traitement, utilisation, C. Demarquilly Ed., Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, pp 23-46.
- Demarquilly C., 1993. *Qualité de conservation de l'ensilage en balles : quelles perspectives liées à l'emploi de conservateurs, au tronçonnement ? Que peut-on escompter des nouvelles techniques qui apparaissent ?* In : Commission ensilage, journée technique de Varennes s/Allier le 17 juin 1993, Comité des Plastiques en Agriculture, Paris, pp 46-50.
- Demarquilly C., Andrieu J.-P., Sauvant D., 1980a. *Tableaux de la valeur nutritive des aliments*. In : Alimentation des ruminants, R. Jarrige Ed., Institut National de la Recherche Agronomique, Versailles, pp 519-584.

- Demarquilly C., Andrieu J.-P., Sauvant D., Dulphy J.-P., 1980b. *Composition et valeur nutritive des aliments*. In : Alimentation des ruminants, R. Jarrige Ed., Institut National de la Recherche Agronomique, Versailles, pp 469-518.
- Dervin C., 1988. *Comment interpréter les résultats d'une analyse factorielle des correspondances ?* STAT-ITCF™, Institut Technique des Céréales et Fourrages, Paris, 75 p.
- Desvals L., 1991. *Programme : constitution des réserves fourragères*. Rapport de stage, I.E.M.V.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, Nouvelle-Calédonie, Païta, 19 p.
- Desvals L., 1992. *Valorisation de fourrages conservés sous forme d'ensilage par des bovins en croissance à La Réunion*. Mémoire pour l'obtention du D.E.S.S. Productions Animales en Régions Chaudes, C.I.R.A.D. - E.M.V.T. de Maisons-Alfort, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Pierre de La Réunion, 70 p.
- Dhuin J.C., 1993. *Analyse des coûts de chantiers d'ensilage en balles enrubannées*. Rapport de stage D.E.S.S. de Biostatistiques à l'Université de Montpellier, C.I.R.A.D. - S.A.R., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, n° 85/93, 25 p.
- Dinhut J.-M., 1980. *Associations Foncières Pastorales - Bilan de cinq années de fonctionnement*. S.U.A.D. Chambre d'Agriculture, S^t Denis de La Réunion, 24 p.
- Duche A., Lefevre P., Sabroux V., Berdon D., Bernard G., 1989. *Les techniques d'analyses d'aliments du bétail appliquées à l'I.E.M.V.T.* Note technique, C.I.R.A.D. - I.E.M.V.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, Maisons Alfort.
- Dugmore T.J., Du Toit J.H., 1988. *The chemical composition and nutritive value of kikuyu pasture*. In : South African Tydskr. Veek., 18 (2), pp 72-75.
- Dulphy J.-P., 1979. *Conséquences des variations de la qualité des ensilages sur la valeur nutritive et les performances des animaux*. In : La conservation des ensilages, Cycle Approfondi d'Alimentation Animale, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, pp 129-166.
- Dulphy J.-P., 1987. *Fenaïson : pertes en cours de récolte et de conservation*. In : Les fourrages secs : récolte, traitement, utilisation, C. Demarquilly Ed., Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, pp 103-124.
- Dulphy J.-P., Demarquilly C., 1981a. *Problèmes particuliers aux ensilages*. In : Prévion de la valeur nutritive des aliments des ruminants, Ed. Institut National de la Recherche Agronomique, Versailles, pp 81-104.
- Dulphy J.-P., Michalet-Doreau B., 1981b. *Prévion de l'ingestibilité des ensilages d'herbe*. In : Prévion de la valeur nutritive des aliments des ruminants, Ed. Institut National de la Recherche Agronomique, Versailles, pp 169-187.
- Fenlon D.R., Wilson J. Weddell J.R., 1989. *The relationship between spoilage and Listeria monocytogenes contamination in bagged and wrapped big bale silage*. In : Grass and Forage Science, Aberdeen, vol. 44, pp 97-100.

Bibliographie

- Fiévet M., 1982. *Calcul des charges entraînées par l'utilisation du matériel*. In : La Gestion des Equipements, Assemblée Générale 1982, Institut de Gestion et d'Economie Rurale, Paris, pp 155-163.
- Frater H., Schüller M., 1992. *Le grand livre de Microsoft Excel™ 4.0*. Microsoft ®, 1220 p.
- Fujita H., 1976. *Length of storage period of grass silage as a regulating factor in the utilization of silage nitrogen in ruminants*. In : Japanese Journal of Zootech. Science, Obihiro-shi, 47, (4), pp 224-232.
- G.N.I.S., 1983. *La graminée fourragère des régions pluvieuses : le ray-grass anglais*. Document 80.16, Groupement National Interprofessionnel des Semences et des plants, Paris, 8 p.
- G.N.I.S., 1987. *La graminée fourragère qui réussit partout : la fétuque élevée*. Document 87.2, Groupement National Interprofessionnel des Semences et des plants, Paris, 8 p.
- G.N.I.S., 1989. *Pour les sols sains, la graminée fourragère pérenne et très productive : le brome*. Document 89.2, Groupement National Interprofessionnel des Semences et des plants, Paris, 8 p.
- Gaillard F., 1973. *Le silo-presse "Kuhn"*. In : Préparation et utilisation des fourrages conservés, V^{èmes} journées d'information du "Grenier de Theix", C.R.Z.V., Institut National de la Recherche Agronomique, novembre 1972, pp 97-101.
- Gaillard F., 1981. *Expérimentation de l'ensilage en balles rondes*. In : Bulletin d'Information du C.N.E.E.M.A., Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Antony, n° 280, mai, pp 23-26.
- Gaillard F., 1982. *L'ensilage en balles rondes*. Rapport technique, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Antony, 12 p.
- Gaillard F., 1987. *L'état de la mécanisation des foins et des pailles, de la parcelle à l'étable*. In : Les fourrages secs : récolte, traitement, utilisation, C. Demarquilly Ed., Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, pp 513-536.
- Gaillard F., 1988. *Compte rendu d'expérimentation de l'emballeuse Silawrap 7510*. Note technique, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montoldre, 10 p.
- Gaillard F., 1989. *L'ensilage en balles rondes sous film étirable*. In : Compte rendus du XVI Congrès International des Herbages, Nice, pp 979-980.
- Gaillard F., 1993a. *Matériels, films et chantiers*. In : Entre foin et ensilage - L'enrubannage, Institut de l'Elevage Ed., Paris, pp 19-26.
- Gaillard F., 1993b. *L'enrubannage, les évolutions récentes en 1993*. In : Commission ensilage, journée technique de Varennes s/Allier du 17 juin 1993, Comité des Plastiques en Agriculture, Paris, pp 1-4.
- Gaillard F., 1994. *Principe, construction et utilisation de la balle témoin selon la norme N.F. T-54191*. Norme AFNOR, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montoldre.

- Gaillard F., Berner J.-L., 1988. *La technique de l'ensilage en balles rondes sous film étirable*. In : Bulletin Technique du Machinisme et des Equipements Agricoles, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Antony, n° 33, octobre, pp 34-44.
- Gaillard F., Berner J.-L., 1989a. *Le banderolage des balles d'ensilage - Etude de l'étanchéité des films*. In : Bulletin Technique du Machinisme et des Equipements Agricoles, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Antony, n°36, pp 35-43.
- Gaillard F., Berner J.-L., 1989b. *Le banderolage des balles d'ensilage - Approche économique*. In : Bulletin Technique du Machinisme et des Equipements Agricoles, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Antony, n°37, mars, pp 9-16.
- Gaillard F., Boffety D., 1993. *Vieillessement des films en exposition naturelle*. Note technique, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montoldre, 4 p.
- Gaillard F., Dewulf B., 1991. *L'adoption de l'enrubannage : les éléments à prendre en compte*. In : Bulletin Technique du Machinisme et des Equipements Agricoles, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Antony, n° 56, mars-avril, pp 9-17.
- Gaillard F., Zwaenepoel Ph., 1987. *L'ensilage de balles rondes sous film étirable*. In : Bulletin Technique du Machinisme et des Equipements Agricoles, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Antony, n° 18, juin, pp 37-46.
- Génére, 1989. *Etude de l'E.T.P. Penman à l'île de La Réunion*. I.R.A.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Pierre de La Réunion, 17 p + annexes.
- Gieroba J., Nowak J., 1994. *Quality of grass silage in the round bales*. In : Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering, 29th august - 1st september, Milano, pp 531-532.
- Gilibert J., 1981. *Productions fourragères en plein champ - Quantités et qualités*. Etablissement Départemental de l'Elevage, Chambre d'Agriculture, S^t Denis de La Réunion, 147 p.
- Gilibert J., 1983. *Tables de valeurs alimentaires de certains aliments pour ruminants à La Réunion*. Etablissement Départemental de l'Elevage, Chambre d'Agriculture, S^t Denis de La Réunion, 14 p.
- Givens D.I., Moss A.R., Adamson A.H., 1993. *The digestibility and energy value of badly preserved grass silages*. In : Animal Feed Science and Technology, Amsterdam, 42, pp 97-107.
- Gouet J.-P., Philippeau G., 1989. *Comment interpréter les résultats d'une analyse de variance ? STAT-ITCF™*, Institut Technique des Céréales et Fourrages, Paris, 47 p.
- Gouet Ph., 1979a. *Les bactéries des ensilages*. In : La conservation des ensilages, Cycle Approfondi d'Alimentation Animale, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, pp 18-40.
- Gouet Ph., 1979b. *Influence de la consommation d'ensilage sur la qualité des produits laitiers*. In : La conservation des ensilages, Cycle Approfondi d'Alimentation Animale, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, pp 167-177.

Bibliographie

- Gouet Ph., Girardeau J.-P., Riou Y., 1979. *La flore microbienne des ensilages - II. Intérêt de l'inoculation de bactéries lactiques dans les ensilages de fourrages verts, influence du nombre, du conditionnement et de l'addition de glucides.* In : Bulletin Technique, C.R.Z.V., Institut National de la Recherche Agronomique, Theix, (37), pp 25-30.
- Haigh P.M., 1990. *Effect of herbage water-soluble carbohydrate content and weather conditions at ensilage on the fermentation of grass silages made on commercial farms.* In : Grass and Forage Science, vol. 45, Cardiff, pp 263-271.
- Harris C.E., Tullberg J.N., 1980. *Pathways of water loss legumes and grasses cut for conservation.* In : Grass and Forage Science, Berks, vol. 35, pp 1-11.
- Heron S.J.E., Wilkinson J.F., Duffus C.M., 1993. *Enterobacteria associated with grass and silages.* In : Journal of Applied Bacteriology, Cleveland, 75, pp 13-17.
- Höhn, 1980. *Essais comparatifs de faneuses-andaineuses.* In : Bulletin de la FAT, Tänikon, 5/80, février, pp 201-208.
- Höhn, 1981. *Essais comparatifs de faucheuses-conditionneuses.* In : Bulletin de la FAT, Tänikon, 5/81, mars, pp 237-240.
- Höhn, 1988. *Essais comparatifs de faucheuses-conditionneuses.* In : Rapports FAT, Tänikon, 306, février, 9 p.
- Höhn, 1989. *Andaineurs : pas uniquement des différences de prix.* In : Rapports FAT, Tänikon, 357, 7 p.
- Honig H., 1991. *Reducing losses during storage and unloading of silage.* Institute of Grassland and Forage Research, Sonderheft, n° 123, pp 116-128.
- I.T.E.B., 1985. *Les silos, un choix difficile.* Rapport technique, Institut Technique de l'Elevage Bovin, Paris, pp 115-130.
- I.N.S.E.E., 1992. *Recensement général de la population en 1990 - Population - Activité - Ménages - Le département et ses communes - 974 Réunion.* Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, 177 p.
- Isselstein, 1993a. *Influence of slight shading, sward density and nitrogen fertilization on yield and nutritive value of Lolium multiflorum Lam.* In : Journal of Agronomy and Crop Science, Paul Parey Scientific Publishers, Berlin, 170, pp 341-347.
- Isselstein, 1993b. *Ensilability and silage quality of Lolium multiflorum (Lam) as influenced by slight shading and N-fertilization.* In : Agrobiological Research, Frankfurt, 46, 1, pp 40-45.
- Jarrige R., 1980. *Digestion.* In : Alimentation des ruminants, R. Jarrige Ed., Institut National de la Recherche Agronomique, Versailles, pp 23-45.
- Jones D.I.H., Jones R., Moseley G., 1990. *Effect of incorporating rolled barley in autumn-cut ryegrass silage on effluent production, silage fermentation and cattle performance.* In : Journal of Agricultural Science, Cambridge, 115, pp 399-408.
- Jones L., 1979. *The effect of stage of growth on the rate of drying of cut grass at 20 °C.* In : Grass and Forage Science, Hurley, vol. 34, pp 139-144.

- Jones L., Harris C.E., 1980. *Plant and swath limits to drying*. The Grassland Research Institute, Berkshire, pp 53-60.
- Jones L., Prickett J., 1981. *The rate of water loss from cut grass of different species dried at 20 °C*. In : Grass and Forage Science, Hurley, vol. 36, pp 17-23.
- Jonsson A., Lindberg H., Sundäs S., Lingvall P., Lindgren S., 1990. *Effect of additives on the quality of big-bale silage*. In : Animal Feed Science and Technology, Amsterdam, 31, pp 139-155.
- Kavanagh A., Daly O.G., 1987. *Structures for silage*. In : Handbook series, Dublin, n° 25, 18 p.
- Keckler D., Bresnahan T., Hébert J.A., 1993. *Grapher™ for Windows*. Golden Software Inc.®, Golden, USA.
- Kennedy S.J., 1990a. *Comparison of the fermentation quality and nutritive value of sulphuric and formic acid-treated silages fed to beef cattle*. In : Grass and Forage Science, Antrim, vol. 45, pp 17-28.
- Kennedy S.J., 1990b. *An evaluation of three bacterial inoculants and formic acid as additives for first harvest grass*. In : Grass and Forage Science, Antrim, vol. 45, pp 281-288.
- Kim K.H., Uchida S., 1991. *Comparative studies of ensiling characteristics between temperate and tropical species*. In : Journal of Japan Grassland Science, Okayama, 36, (4), pp 426-433.
- Kota M.V., 1989. *The effect of crude fibre on the quality of the silage*. In : Proceedings of the XVI International Grassland Congress, Nice, pp 963-964.
- Kuhn S.A., 1972. *Kuhn Silo-presse*. Documentation technique, Kuhn S.A., Saverne, 4 p.
- Lambert C., 1993a. *Films étirables pour l'enrubannage des balles rondes*. In : Commission ensilage, journée technique de Varennes s/Allier le 17 juin 1993, Comité des Plastiques en Agriculture, Paris, pp 5-9.
- Lambert C., 1993b. *Certification et qualité du produit*. In : Commission ensilage, journée technique de Varennes s/Allier le 17 juin 1993, Comité des Plastiques en Agriculture, Paris, pp 10-11.
- Lamond W.J., Graham R., 1993a. *The Relationship between the equilibrium moisture content of grass mixtures and the temperature and humidity of the air*. In : Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 56, pp 327-335.
- Lamond W.J., Graham R., 1993b. *Relationship between air conditions and the drying rate of thin-layers of grass*. In : Journal of Agricultural Science, Cambridge, 121, pp 21-28.
- Lanot F., 1993. *Bilan zootechnique de la ferme S.E.D.A.EL*. Document, C.I.R.A.D. - Elevage, S.I.C.A. - RE.VIA., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, 87 p.
- Lavezzo W., Lavezzo Otàvia E.N.M., Rossi C., Bonassi I.A., 1989. *Effects of wilting and formic acid on the chemical composition and nutritive value of elephant grass silage Pennisetum purpureum Schum purple cultivar*. In : Proceedings of the XVI International Grassland Congress, Nice, pp 965-966.

Bibliographie

- Le Duc J.-C., 1993. *La Marque N.F. films plastiques*. In : Commission ensilage, journée technique de Varennes s/Allier le 17 juin 1993, Comité des Plastiques en Agriculture, Paris, pp 12-25.
- Lefebvre J.-M., Joliet E., 1967. *Etude des variations de la composition protidique et glucidique des parties aériennes du dactyle*. In : Annales Agronomiques, Institut National de la Recherche Agronomique, Dijon, 18 (5), pp 529-543.
- Leibensperger R.Y., Pitt R.E., 1987. *A model of clostridial dominance in ensilage*. In : Journal of Food and Forage Science, New-York, 42, pp 297-317.
- Lepetit J., 1992a. *Bilan de la demi-campagne balle ronde enrubannée conduite sur les plaines en 1992*. Note technique, Union des Associations Foncières Pastorales, Tampon, 20 p.
- Lepetit J., 1992b. *Comparaison des coûts de récolte entre l'ensilage double coupe et l'ensilage préfané coupe fine*. Note technique, Union des Associations Foncières Pastorales, 16 p.
- Lepetit J., Paillat J.-M., 1992. *Bilan de la campagne 1991 des ensilages en balles enrubannées - Analyse de la technique et des coûts*. Synthèses et études spécifiques, C.I.R.A.D. - Elevage, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Pierre de La Réunion, n° 10, 14 p.
- Lepetit J., Paillat J.-M., Fontaine F., Barbet-Massin V., 1993. *Ensilage ressuyé en brins courts*. Poster C.I.R.A.D. - Union des A.F.P. - Chambre d'Agriculture - S.I.C.A. Lait, C.I.R.A.D. - S.A.R., S^t Denis de La Réunion.
- Lindgren S., Bromander A., Pettersson K., 1988. *Evaluation of silage additives using scale-model silos*. In : Swedish Journal of Agricultural Research, Uppsala, 18, pp 41-49.
- Lindgren S., Pettersson K., Kaspersson A., Jonsson A., Lingvall P., 1985. *Microbial dynamics during aerobic deterioration of silages*. In : Journal of Science and Food Agricultural, Uppsala, 36, pp 765-774.
- Lingvall P., Lindberg H., Jonsson A., 1989. *The impact of packing technique, plastic film and silage additives on round bale silage quality*. Department of Animal Nutrition and Management, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, pp 240-248.
- Lundén Pettersson K., Lindgren S., 1990. *The influence of carbohydrate fraction and additives on silage quality*. In : Grass and Forage Science, Uppsala, vol. 45, pp 223-233.
- Macpherson H.T., 1952. *Changes in nitrogen distribution in crop conservation*. In : Journal of Science and Food Agricultural, Edinburgh, 3, august, pp 365-367.
- Maheu F., Michellon R., 1985. *Comparaison d'espèces et variétés de graminées et légumineuses fourragères tropicales dans les Hauts au vent (à Grand Etang S^t Benoit)*. Fiche d'essai n° 4, I.R.A.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, 6 p.
- Makoni N.F., Shelford J.A., Nakai S., Fisher L.J., 1993. *Changes in lipids, chlorophyll pigments, hot water insoluble N and pH of alfalfa during ensiling*. In : Journal of Science and Food Agricultural, Vancouver, 63, pp 273-280.
- McDonald P., Henderson A.R., 1962. *Buffering capacity of herbage samples as a factor in ensilage*. In : Journal of Science and Food Agricultural, vol. 13, pp 395-400.

- McDonald P., Henderson A.R., Heron S.J.E., 1991. *The biochemistry of silage*. Second edition, Chalcombe Publications, Marlow, 340 p.
- McGechan M.B., 1989. *A review of losses arising during conservation of grass forage - Part 1 : field losses*. In : Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 44, pp 1-21.
- McGechan M.B., 1990a. *Operational research study of forage conservation systems for cool, humid upland climates - Part 1 : description of model*. In : Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 45, pp 117-136.
- McGechan M.B., 1990b. *Operational research study of forage conservation systems for cool, humid upland climates - Part 2 : comparison of hay and silage systems*. In : Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 46, pp 129-145.
- McGechan M.B., 1990c. *A review of losses arising during conservation of grass forage - Part 2 : storage losses*. In : Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 45, pp 1-30.
- McGechan M.B., Graham R., 1993. *The rewetting of partially dried grass swaths by rain : part 3, laboratory investigation into the rewetting process*. In : Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 55, pp 45-56.
- McGechan M.B., Pitt R.E., 1990. *The rewetting of partially dried grass swaths by rain : part 2, exploratory experiments into absorption and drying rates*. In : Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 45, pp 69-76.
- Melvin J.F., Simpson B., 1963. *Chemical changes and respiratory drift during the air drying of ryegrass*. In : Journal of Science and Food Agricultural, vol. 14, april, pp 228-234.
- Mericq C., 1980. *Bilan de la situation fourragère dans les Hauts de l'île de La Réunion*. Union des Associations Foncières Pastorales, Tampon, 94 p.
- Messonnier E., Soyeux Y., 1979. *Conséquences pathologiques de l'utilisation des ensilages*. In : La conservation des ensilages, Cycle Approfondi d'Alimentation Animale, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, pp 178-196.
- Michallik J., 1987. *Use of single-layer and multilayer films in silage preperation*. In : Kunsystoffe German Plastics, 77, 7, pp 702-704.
- Michellon R., Pichot J., Rassaby A., 1982. *Comportement et réponse du kikuyu à l'azote et au chaulage dans les Hauts sous le vent*. Fiche d'essai n° 54, Institut de Recherche en Agronomie Tropicale, S^t Denis de La Réunion, 58 p + annexes.
- Michellon R., Rassaby A., 1984a. *Comportement de divers bromes dans les Hauts sous le vent*. Fiche d'essai n° 6, Institut de Recherche en Agronomie Tropicale, S^t Denis de La Réunion, 9 p.
- Michellon R., Rassaby A., 1984b. *Comportement et réponse du kikuyu à l'azote et au chaulage - Troisième année d'expérimentation*. Fiche d'essai n° 12, Institut de Recherche en Agronomie Tropicale, S^t Denis de La Réunion, 11 p.
- Michellon R., Rassaby A., 1984c. *Comportement de divers ray-grass dans les Hauts sous le vent*. Fiche d'essai n° 13, Institut de Recherche en Agronomie Tropicale, S^t Denis de La Réunion, 9 p.

Bibliographie

Michellon R., Rassaby A., 1985a. *Comportement de diverses fétuques élevées dans les Hauts de l'Ouest*. Fiche d'essai n° 7, I.R.A.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, 9 p.

Michellon R., Rassaby A., 1985b. *Comportement et réponse du kikuyu à l'azote et au chaulage dans les Hauts de l'Ouest - Quatrième année d'expérimentation*. Fiche d'essai n° 20, I.R.A.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, 6 p.

Michellon R., Rassaby A., 1985c. *Comportement de diverses graminées fourragères dans les Hauts de l'Ouest*. Fiche d'essai n° 23, I.R.A.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, 10 p.

Morel D'Arleux F., 1993. *Stockage et distribution*. In : Entre foin et ensilage - L'enrubannage, Institut de l'Elevage Ed., Paris, pp 27-29.

Morel D'Arleux F., Gaillard F., Pflimlin A., 1989. *Les balles rondes enrubannées : une nouvelle technique d'ensilage*. Rapport, Institut Technique de l'Elevage Bovin, Paris, 22 p.

Muck R.E., Dickerson J.T., 1988. *Storage temperature effects on proteolysis in alfalfa silage*. In : Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Madison, vol. 31 (4), july-august, pp 1005-1009.

Müller M., Lier D., 1994. *Fermentation of fructans by epiphytic lactic acid bacteria*. In : Journal of Applied Bacteriology, 76, pp 406-411.

Müller Th., Fehrmann E., Seyfarth W., Knabe O., 1990. *Quality of grass silage depending on epiphytic lactic acid bacteria*. Institute of Forage Production, Paulinenaue, pp 297-300.

Norusis M.J., 1990. *Logiciel SPSS™*. SPSS inc.®.

O'Kiely P., 1993. *Influence of a partially neutralised blend of aliphatic organic acids on fermentation, effluent production and aerobic stability of autumn grass silage*. In : Irish Journal of Agricultural and Food Research, 32, pp 13-26.

Ohshima M., McDonald P., 1978. *A review of changes in nitrogenous compounds of herbage during ensilage*. In : Journal of Science and Food Agricultural, Edinburgh, 29, pp 497-505.

Östling C.E., Lindgren S.E., 1993. *Inhibition of enterobacteria and Listeria growth by lactic, acetic and formic acids*. In : Journal of Applied Bacteriology, Uppsala, 75, pp 18-24.

Paillat J.-M., 1986. *Implantation des prairies*. In : rapport annuel C.E.E.M.A.T. 1986, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, pp 108-123.

Paillat J.-M., 1987a. *Opération ensilage dans les Hauts de l'Ouest en avril 1987*. Note technique, C.E.E.M.A.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, 7 p.

Paillat J.-M., 1987b. *Coûts de création de prairies - Semis et plantation des prairies*. In : rapport annuel C.E.E.M.A.T. 1987, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, p 51-58.

- Paillat J.-M., 1988a. *Rapport ensilages 1988*. Note technique, C.E.E.M.A.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, 12 p.
- Paillat J.-M., 1988b. *Récolte et conservation des cultures fourragères : ensilages d'herbe*. In : rapport annuel C.E.E.M.A.T. Réunion 1988, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, p 53-68.
- Paillat J.-M., 1989. *Régénération et entretien des prairies*. In : rapport annuel C.E.E.M.A.T. Réunion 1989, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, pp 51-57.
- Paillat J.-M., 1994. *L'épandage de mélasse : une nécessité pour la conservation de l'ensilage - Aspects techniques et économiques, recommandations*. Fiche technique, C.I.R.A.D. - S.A.R., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, 6 p.
- Paillat J.-M., Dhuin J.-C., Lepetit J., Mandret G., 1993. *Preservation of silage made in wrapped round bales in Réunion Island*. In : Proceedings of the XVII International Grassland Congress, 8- 21 february 1993, New-Zealand, pp 585-586.
- Paillat J.-M., Dhuin J.-C., Pirot R., 1994. *Cost analysis of silage in wrapped round bales in the Réunion highlands*. In : Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering, AgEng 94, Milano, 29th august - 1st september, pp 649-650.
- Paillat J.-M., Lepetit J., 1990. *Ensilage en balles rondes enrubannées - Résultats des essais 1990*. In : Rapport 1990 C.E.E.M.A.T. Réunion, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, pp 35-60.
- Paillat J.-M., Lepetit J., 1992. *Conservation des ensilages en balles rondes enrubannées - année 1991*. In : Synthèses et Etudes Spécifiques du C.I.R.A.D. Elevage, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, 10 p.
- Paillat J.-M., Perret S., 1988. *Travail du sol pour l'implantation des prairies*. In : rapport annuel C.E.E.M.A.T. Réunion 1988, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, pp 111-124.
- Papendick K., 1977. *Un silo-tour pour fourrage en film PVC*. In : Plasticulture, n° 35, septembre, pp 22-26.
- Parke D., Dumont A.G., Boyce D.S., 1978. *A mathematical model to study forage conservation methods*. In : Journal of the British Grassland Society, Silsoe, vol. 33, pp 261-273.
- Pattey E., Savoie P., Dubé P.A., 1987. *The effect of a hay tedder on the field drying rate*. In : Canadian Agricultural Engineering, Québec, 30, pp 43-50.
- Perret S., 1992. *Etude de propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de La Réunion - Facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons cultureux, implications agronomiques et écologiques*. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, 278 p. + annexes.

Bibliographie

- Philippeau G., 1986. *Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales ?* STAT-ITCF™, Institut Technique des Céréales et Fourrages, Paris, 63 p.
- Pichot J., Philoté A., 1982a. *Collection de fourrages dans les Hauts de Menciol*. Fiche d'essai n° 22, Institut de Recherche en Agronomie Tropicale, S^t Denis de La Réunion, 8 p.
- Pichot J., Philoté A., Billaud J.-C., 1982b. *Réponse du kikuyu à l'azote et au chaulage - Recherche coordonnée S.E.D.A.E.L. - I.R.A.T.* Fiche d'essai n° 23, Institut de Recherche en Agronomie Tropicale, S^t Denis de La Réunion, 6 p.
- Pitt R.E., 1990. *A model of cellulase and amylase additives in silage*. In : Journal of Dairy Science, Ithaca, 73, pp 1788-1799.
- Pitt R.E., Leibensperger, 1987. *The effectiveness of silage inoculants : a systems approach*. In : Agricultural Systems, New-York, 25, pp 27-49.
- Pitt R.E., McGechan M.B., 1990. *The rewetting of partially dried grass swaths by rain : part 1, lumped and distributed models of moisture fluctuation*. In : Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 45, pp 55-67.
- Pitt R.E., Muck R.E., 1993. *A diffusion model of aerobic deterioration at the exposed face of bunker silos*. In : Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 55, pp 11-26.
- Poethier J., 1987. *Les prairies à La Réunion : techniques et coûts d'implantation*. Mémoire de fin d'études de l'Institut Supérieur Technique d'Outre-Mer, C.E.E.M.A.T., Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Denis de La Réunion, 113 p. + annexes.
- Royer V., Bertaux S., Caumont A., Xandé A., Champanhet F., 1992. *Foin humide de graminées tropicales conservé sous film plastique étirable - Rapport d'étape, premiers résultats, campagne 1992*. Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Groupement Outre-Mer, Fort de France, 15 p + annexes.
- Royer V., Bertaux S., David F., 1993. *Une alternative pour passer le carême : le foin humide conservé sous film plastique étirable*. Note technique n° 15, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Groupement Outre-Mer, Fort de France, 7 p.
- Salon S., 1992. *Typologie des élevages bovins de La Réunion*. In : Rapport d'activités 1992, C.I.R.A.D. - Elevage, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Pierre de La Réunion, pp 17-21.
- Sauvant D., Gouet Ph., 1979. *Les relations entre les processus fermentaires : conséquences pour l'appréciation quantitative de la qualité de la conservation*. In : La conservation des ensilages, Cycle Approfondi d'Alimentation Animale, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, pp 41-77.
- Savoie Ph., 1987. *Physical alterations of polyethylene film used to cover silage*. In : American Society of Agricultural Engineers, vol. 3 (2), november, pp 145-147.
- Savoie Ph., 1988. *Hay tedding losses*. In : Canadian Agricultural Engineering, Québec, 30, pp 39-42.
- Sedeme. *Capteurs et transmetteurs de pressions différentielles et relatives*. Sedeme-Kistler, 4 p.

- Service de la Météorologie Nationale, 1987. *Analyse des séquences de trois et quatre jours sans pluie - Novembre à mai 1966-1985*. Chambre d'Agriculture, Etablissement Départemental de l'Elevage, 12 p.
- Singainy E., 1992. *Compréhension des phénomènes d'échanges gazeux intervenant dans les balles enrubannées - Etalonnage sur fût étanche*. Rapport de stage de maîtrise de physique et applications, Université de La Réunion, Etudes et Synthèses, C.I.R.A.D. - Elevage, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, S^t Pierre de La Réunion, 25 p. + annexes.
- Singh R., Kamra D.N., Jakhmola R.C., 1984. *Ensiling of leguminous green forages in combination with different dry roughages and molasses*. In : *Animal Feed Science and Technology*, Amsterdam, 12, pp 133-139.
- Spoelstra S.F., Courtin M.G., VanBeers J.A.C., 1988. *Acetic acid bacteria can initiate aerobic deterioration of whole crop maize silage*. In : *Journal Agric. Science Camb.*, 111, pp 127-132.
- Spoelstra S.F., Steg A., Beuvink J.M.W., 1990. *Application of cell wall degrading enzymes to grass silage*. Chap. 7.2, pp 165-172.
- Thomas C., Thomas P.C., 1985. *Factors affecting the nutritive value of grass silages*. In : *Recent Developments in ruminant nutrition - 2*, Haresign W. and Cole D.J.A. Ed., Nottingham, pp 274-307.
- Thompson N., 1981. *Modelling the field drying of hay*. In : *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 97, pp 241-260.
- Thouroude D., 1980. *Balles rondes et ensilage d'herbe*. In : *Bulletin d'Information du C.N.E.E.M.A., CEMAGREF, Antony*, n° 268, mai, pp 55-60.
- Tjandraatmadja M., Norton B.W., MacRae I.C., 1990. *A numerical taxonomic study of lactic acid bacteria from tropical silages*. In : *Journal of Applied Bacteriology*, S^t Lucia, 68, pp 543-553.
- Tjandraatmadja M., Norton B.W., Mac Rae I.C., 1994a. *Ensilage characteristics of three tropical grasses as influenced by stage of growth and addition of molasses*. In : *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 10, Oxford, pp 74-81.
- Tjandraatmadja M., Norton B.W., Mac Rae I.C., 1994b. *Ensilage of tropical grasses mixed with legumes and molasses*. In : *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 10, Oxford, pp 82-87.
- Tomassone R., 1988. *Comment interpréter les résultats d'une analyse factorielle discriminante ?* STAT-ITCF™, Institut Technique des Céréales et Fourrages, Paris, 56 p.
- Tomassone R., 1989. *Comment interpréter les résultats d'une régression linéaire ?* STAT-ITCF™, Institut Technique des Céréales et Fourrages, Paris, 55 p.
- Tomassone R., Dervin C., 1993. *Régression non linéaire - Comment interpréter les résultats ?* STAT-ITCF™, Institut Technique des Céréales et Fourrages, Paris, 109 p.
- Tranchefort J., Beaux M.F., Gouet H., Gouet J.-P., Morleghe P., Philippeau G., Verneau M., 1991. *Manuel d'utilisation*. STAT-ITCF™, Institut Technique des Céréales et Fourrages, Paris.

Bibliographie

Umana R., Staples C.R., Bates D.B., Wilcox C.J., Mahanna W.C., 1991. *Effects of a microbial inoculant and (or) sugarcane molasses on the fermentation, aerobic stability, and digestibility of Bermudagrass ensiled at two moisture contents*. In : Journal of Animal Science, Gainesville, 69, pp 4588-4601.

Union des A.F.P., 1994. *Bilan des actions conduites en 1993*. Union des Associations Foncières Pastorales, Tampon, 21 p. + annexes.

Union des A.F.P., 1995. *Prévisions d'acquisitions de matériels pour 1995*. Union des Associations Foncières Pastorales, Tampon.

Vincent M.-O., 1986. *Calculez le coût de votre matériel*. In : Entreprises Agricoles, n° 191, pp 39-41.

Watson J.P., 1991. *Linear low density polyethylene films for animal feed production*. In : Proceedings of the XI International Congress on the Use of Plastics in Agriculture, B.P. Chemicals, Stirlingshire, pp D41-D45.

Wattiaux M.A., Satter L.D., Mertens D.R., 1993. *Factors affecting volume and specific gravity measurements of neutral detergent fiber and forage particules*. In : Journal of Dairy Science, 76, Madison, pp 1978-1988.

Wilman D., Owen I.G., 1982. *Effects of stage of maturity, nitrogen application and swath thickness on the field drying of herbage to the stage*. In : Journal of Agricultural Science, Cambridge, 99, pp 577-586.

Wood J.G.M., Parker J., 1971. *Respiration during the drying of hay*. In : Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 16 (3), pp 179-191.

Woolford M.K., 1990. *A review : the detrimental effects of air on silage*. In : Journal of Applied Bacteriology, Oxford, 68, pp 101-116.

Xandé A., 1978. *L'ensilage d'herbe, une technique de conservation de l'herbe permettant de pallier au déficit alimentaire des ruminants durant la période de carême - I : aspects théorique et pratique - particularité des fourrages tropicaux*. In : Nouvelles Agronomiques Antilles-Guyane, S.R.Z., Institut National de la Recherche Agronomique, Petit-Bourg, 4, 2, pp 63-80.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

Sigles des organismes cités dans le texte

- A.F.P. : Associations Foncières Pastorales regroupées au sein d'une Union à partir de 1980
- A.P.R. : Association pour la Promotion en milieu Rural, animation rurale autour de projets agricoles et/ou artisanaux
- A.R.I.B.E.V. : Association Réunionnaise Interprofessionnelle du Bétail et des Viandes, gérant les fonds FODEBO pour la viande et FODELAIT pour le lait qui garantissent les prix à la production
- AFNOR : Association Française de Normalisation
- B.C.M.E.A. : Bureau Commun du Machinisme et des Equipements Agricoles devenu Bureau de Coordination du Machinisme Agricole
- B.I.P.E.A. : Bureau InterProfessionnel d'Etudes Analytiques
- C.A.H. : Commissariat à l'Aménagement des Hauts, unité D.A.T.A.R. chargée de la politique de développement des Hauts de l'île
- C.I.R.A.D. : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
- C.I.R.A.D. - E.M.V.T. : C.I.R.A.D. département d'Elevage et de Médecine Vétérinaire Tropicale
- C.I.R.A.D. - S.A.R. : C.I.R.A.D. département des Systèmes Agro-alimentaires et Ruraux
- C.N.E.R.N.A. : Centre National de coordination des Etudes et Recherches sur la Nutrition et l'Alimentation
- C.O.R.D.E.T. : Commision d'Orientation des Recherches dans les D.O.M. et T.O.M., Ministère des D.O.M. T.OM.
- C.U.M.A. : Coopérative d'Utilisation du Matériel en Commun
- CEMAGREF : Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
- D.A.F. : Direction de l'Agriculture et de la Forêt
- D.S.V. : Direction des Services Vétérinaires
- E.D.E. : Etablissement Départemental de l'Elevage, Chambre d'Agriculture de La Réunion
- F.R.C.A. : Fédération Régionale des Coopératives Agricoles
- G.D.S.B.R. : Groupement de Défense Sanitaire des Bovins de la Réunion
- I.G.E.R. : Institut de Gestion et d'Economie Rurale
- I.N.A. - PG : Institut National Agronomique Paris - Grignon
- I.N.R.A. : Institut National de la Recherche Agronomique
- I.N.S.E.E. : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
- I.R.A.T. : Institut de Recherche en Agronomie Tropicale (actuellement C.I.R.A.D. département des cultures annuelles)
- L.N.E. : Laboratoire National d'Essais
- L.V.D. : Laboratoire Vétérinaire Départemental (Conseil Général de La Réunion)

Sigles et abréviations

R.G.B. : Réunion Génétique Bovine, groupement d'éleveurs en sélection laitière

S.A.F.E.R. : Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural, installation d'éleveurs sur des lotissements agricoles après reprise des terres en friches ou mal exploitées, notamment

S.E.D.A.EL. : Société d'Etudes et de Développement pour l'Amélioration de l'Elevage : amélioration génétique du cheptel viande

S.I.C.A. - Lait : Société d'Intérêt Collectif Agricole chargée de la collecte laitière, de l'élevage de génisses laitières et d'approvisionnement

S.I.C.A. - RE.VIA. : Société d'Intérêt Collectif Agricole Réunion Viande, commercialisation de la production de viande et d'animaux maigres

U.C.A.A.B. : Union des Coopératives Agricoles d'Aliments du Bétail

U.R.COOP.A. : Union Réunionnaise des Coopératives Agricoles, aliments du bétail

Abréviations utilisées dans le texte

ADF : Acid Detergent Fiber

ADL : Acid Detergent Lignin

ADP : Adénosine Di-Phosphate

AGV : Acides Gras Volatils

ATP : Adénosine Tri-Phosphate

C₂ : Acide acétique

C₄ : Acide butyrique

C₆H₁₂O₆ : hexose

CB : Cellulose Brute

Ce : Coefficient d'étanchéité

CO₂ : gaz carbonique

CV : Coefficient de Variation

dégMO : dégradabilité enzymatique de la Matière Organique par la pepsine cellulase Hcl 0.1 N (Aufrère *et al.*, 1988)

dégMS : dégradabilité enzymatique de la Matière Sèche par la pepsine cellulase Hcl 0.1 N (Aufrère *et al.*, 1988)

dMO : digestibilité de la Matière Organique

E : Est

EM : Etendue de Mesure

ETP : Evapo-Transpiration Potentielle

F.F.P.N. : Française Frisonne Pie Noire

GS : Glucides Solubles

H⁺ : ion hydrogène

H₂O : eau

IMD : Intensité Moyenne de Dessiccation

MAT : Matières Azotées Totales

MM : Matières Minérales

MS : teneur en Matière Sèche exprimée en %

MV : Matière Verte

N sol : Azote sous forme soluble exprimé en % de l'azote total

N tot : Azote total (méthode Kjeldhal sur fourrage frais)

N-NH₃ : Azote sous forme ammoniacale exprimé en % de l'azote total

NDF : Neutral Detergent Fiber

NE : Nord - Est

NH₃ : ammoniac

NO : Nord - Ouest

NPP : Nombre le Plus Probable de spores de *Clostridium tyrobutyricum*

O : Ouest

O₂ : oxygène

PDIE : Protéines Digestibles au niveau de l'Intestin, permises par l'Energie

PDIN : Protéines Digestibles au niveau de l'Intestin, permises par l'azote (N)

pH : unité de mesure de l'acidité ou de l'alcalinité

Pi : Phosphore à l'état ionique

REA : Rendement Equivalent en Andain

RFS : Rendement Fourrager en Sec

RFV : Rendement Fourrager en Vert

RG : Ray-Grass

RGA : Ray-Grass Anglais

RGH : Ray-Grass Hybride

RGI : Ray-Grass d'Italie

S : Sud

Sigles et abréviations

SE : Sud - Est

SO : Sud - Ouest

SS : Sucres Solubles

TFA : TetraFormiate d'Ammonium

UV : rayonnement Ultra - Violet

UFC : Unité Formant Colonies (comptage du développement des micro-organismes)

UFL : Unité Fourragère pour la production Laitière

UFV : Unité Fourragère pour la production de Viande

Grandeurs utilisées dans les équations [1] à [10] et [C1] à [C17]

α = constante d'écoulement = 1.4

A = constante de proportionnalité

AM = amortissements (F)

Cp = chaleur spécifique du gaz à pression constante ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

CT = coût total

d = diamètre de la buse (m)

D = taux de dépréciation (%)

ΔP = pression différentielle (Pa)

ΔP_{12} = pression différentielle obtenue en utilisant le débitmètre 0 - 12 l min⁻¹ (Pa)

ΔP_3 = pression différentielle obtenue en utilisant le débitmètre 0 - 3 l min⁻¹ (Pa)

ΔP_m = pression différentielle maximale (mbar)

ΔP_r = pression différentielle à la rupture (mbar)

ΔT = différence de température (K)

FC = frais de carburants (F)

FD = frais divers : assurances et remisage (F)

FF = frais financiers (F)

FL = frais de lubrifiants (F)

FP = frais de pneumatiques (F)

FR = frais de réparations (F)

FT = frais d'achat des filtres (F)

Hr = humidité relative (%)

K = coefficient thermodynamique

k_{12} = coefficient de correction du débitmètre 0 - 12 l min⁻¹

k_3 = coefficient de correction du débitmètre 0 - 3 l min⁻¹

m = débit massique (kg s⁻¹)

M = masse molaire = 29,13 10⁻³ kg mol⁻¹ (air)

n = durée d'amortissement,

Pc = puissance de l'élément chauffant (kJ s⁻¹)

P = puissance nominale du moteur (ch)

Po = pression au niveau de la mer (Pa)

Pe = pression extérieure (Pa)

Pgo = prix du gas-oil (F l⁻¹)

Ph = prix de l'huile (F l⁻¹)

Pi = pression intérieure (Pa)

Pvs = pression de vapeur saturante (Pa)

Qm = débit massique (kg s⁻¹)

Qv = débit volumique (m³ s⁻¹ ou l min⁻¹)

R = constante des gaz = 8,314 J °C⁻¹ mol⁻¹

ρ = masse volumique (kg m⁻³)

ρ_i = masse volumique intérieure (kg m⁻³)

RM = nombre de roues motrices,

S = section de la buse (m²)

Tc = taux de charge du moteur (%),

Te = température extérieure (K)

Ti = taux d'intérêt (%),

Tr = taux de réparation par matériel (%),

Tv = température virtuelle (K)

V = vitesse de l'air (m s⁻¹)

VA = valeur d'achat (F).

z = altitude (m)

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON

**Centre de Coopération Internationale
en Recherche Agronomique
pour le Développement**

département
Systèmes Agro-alimentaires et Ruraux

THESE

présentée par **Jean - Marie PAILLAT**

Ingénieur Agricole **I.S.A. Beauvais**
Ingénieur de recherche **C.I.R.A.D. - S.A.R.**

pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Institut National Agronomique Paris - Grignon

**Etude de l'ensilage en balles enrubannées
sous climat tropical d'altitude**

**Cas des fourrages tempérés et tropicaux
récoltés à l'île de La Réunion**

DOCUMENTS ANNEXES

SOMMAIRE DES ANNEXES

SOMMAIRE

3

ANNEXE A :

7

Modes de stockage	9
Silo taupinière	9
Silo couloir	9
Silo tour.....	10
Silo boudin	10
Balles cylindriques ou parallélépipédiques.....	10
Coupe directe	11
Ressuyage et préfanage.....	12
Intérêt de l'ensilage par rapport à d'autres techniques de stockage.....	13
Teneur en matière sèche à la fauche.....	14
Quelques aspects de la dessiccation du fourrage	14
Améliorations de la dessiccation du fourrage.....	15
Micro-organismes fongiques.....	16
Levures	16
Moisissures	17
Autres bactéries	17
Influence des conditions de réalisation de l'ensilage sur les fermentations et sur la qualité de conservation.....	17
Incorporation de produits nutritifs.....	18
Incorporation de produits absorbants	18
Qualité de conservation des ensilages.....	19
Ensilage et alimentation des ruminants	20
Contaminations microbiennes.....	20
Incidences sur la valeur alimentaire et l'ingestion	20
Pertes en cours de dessiccation	22
Pertes lors de la fermentation.....	22
Pertes à la distribution	23

ANNEXE B :	25
Le dactyle (<i>Dactylis glomerata</i>)	27
Le ray-grass anglais (<i>Lolium perenne</i>)	30
Le ray-grass d'Italie (<i>Lolium multiflorum</i>).....	33
Le ray-grass hybride (<i>Lolium perenne</i> x <i>Lolium multiflorum</i> , ou <i>Lolium hybridum</i>)	36
La fétuque élevée (<i>Festuca arundinacea</i>).....	37
Le brome cathartique (<i>Bromus catharticus</i>)	38
Le kikuyu (<i>Pennisetum clandestinum</i>)	39
Le chloris (<i>Chloris gayana</i>)	42
Abaques de calcul des quantités de mélasse à apporter.....	43
Caractéristiques météorologiques	45
Etude de la dessiccation.....	47
ANNEXE C :	49
Capteurs et centrale de mesures	51
Principe de fonctionnement des débitmètres régulateurs massiques	51
Contrôle des débitmètres régulateurs massiques.....	52
Principe de fonctionnement des transmetteurs de pression	52
Mesures sur fût étanche	53
Balles témoins.....	53
Exposition des films étirables	54
Modélisation des échanges gazeux	55
Equation dimensionnelle	55
Détermination du coefficient expérimental K	55
Equation finale de la modélisation sur fût étanche.....	56
Cas du CO ₂	58
Correction des débits pour l'air humide.....	58
Tests d'étanchéité sur films étirables	59
Etude de la régularité d'étirage des films sur cadre	61
Etude de la longévité des films étirables	63

ANNEXE D :	65
Equipements nécessaires aux suivis des fermentations	67
Fixations des sondes	67
Capteurs de pesée	67
Analyses descriptives de la conservation des ensilages	68
Matrice des corrélations	68
Définition des modalités des variables pour l'AFCM	68
Compléments aux analyses factorielles des correspondances multiples	70
Analyses factorielles discriminantes	72
Etude de l'influence de la teneur en MS	73
Etude de l'influence de l'espèce fourragère	75
Etude de l'influence de l'apport de sucres solubles	76
Etude de l'influence de l'incorporation d'un conservateur biologique	77
Comparaison de différentes techniques d'ensilage	79

ANNEXE E :	81
Réalisation des ensilages	83
Mesures	84
Pesée des balles	84
Détermination de la teneur en MS avec le four à micro-ondes	85
Calculs des coûts des tracteurs	85
Temps de travaux	86
Résultats par opération de récolte	86
Résultats par région	89
Coût de la production fourragère	91
Coût des intrants	92
Film étirable et ficelle de liage	92
Apports de mélasse	92
Coût de la récolte	94
Coût global du stock fourrager réalisé en balles enrubbannées	94
Rentabilité du matériel acquis par l'Union des A.F.P.	97
Analyses des facteurs explicatifs du coût	99
Matrice des corrélations	99
Analyse en composantes principales	99
Caractéristiques des chantiers selon les régions	100
Analyse factorielle discriminante	101
Coût des ensilages réalisés avec d'autres techniques	102
Récolteuse hacheuse et chargeuse à fléaux	102
Récolteuse hacheuse et chargeuse double coupe	102
Récolteuse hacheuse et chargeuse à couteaux	103
Coût d'un stock fourrager constitué par du foin de <i>Chloris gayana</i>	104

ANNEXE A

La récolte des fourrages en ensilage :
complément à l'étude bibliographique

Modes de stockage

Silo taupinière

Le fourrage est simplement mis en tas, comprimé par l'action du poids d'un tracteur et recouvert d'une bâche polyéthylène suffisamment épaisse (150 à 200 μm). Le silo peut être réalisé sur un terrain stabilisé ou sur une plate-forme bétonnée légèrement surélevée. Une bâche posée sur le sol permet une meilleure étanchéité si on prend soin de la remonter le long des bords du tas avant d'appliquer la bâche de recouvrement. Un joint étanche doit être confectionné tout autour du silo (terre, sable, sac ...). A La Réunion, une application de mélasse à l'endroit du joint permet un excellent collage des bâches entre elles (Lepetit *et al.*, 1993). Le chargement des tas avec sacs, pneus ... doit permettre de bien appliquer la bâche sur le fourrage.

Silo couloir

Le silo couloir (I.T.E.B., 1985 ; Kavanagh *et al.*, 1987) est constitué de deux ou trois parois érigées sur une plate-forme en béton en pente de 2 à 3 % vers l'avant du silo. Il présente les mêmes contraintes d'herméticité que le silo taupinière, l'étanchéité sera réalisée par une bâche plastique le long des parois, sur le tas et sur le ou les côtés de chargement. Ce type de silo favorise la reprise mécanisée de l'ensilage. Le silo fosse est une variante dans la mesure où il est creusé dans la terre qui constitue alors les murs. La difficulté de cette technique réside dans la prévention contre l'apport d'eau, l'évacuation de cette eau, la stabilité du terrain pour la reprise de l'ensilage et la pénétrabilité de la reprise au désilage.

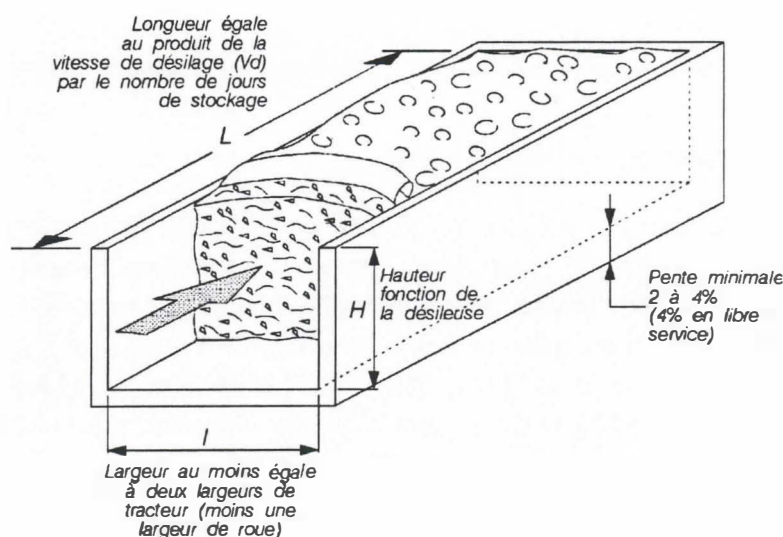


Figure A1 : Principe du dimensionnement d'un silo couloir (source : CEMAGREF)

Silo tour

Le silo tour, fabriqué en acier, béton bois ... atteint plusieurs mètres de hauteur et est généralement cylindrique. Il est plus adapté aux fourrages préfanés qui présentent des densités de stockage plus faibles. Le chargement et la reprise peuvent être réalisés avec des équipements spécifiques. Le coût de ce type de silo est généralement très élevé. Des petits silos tours, réalisés avec un sac en polyéthylène contenu par une armature amovible (Papendick, 1977) peuvent présenter un intérêt.

Silo boudin

Le silo boudin était réalisé par une machine spéciale coûteuse (Gaillard, 1973) qui pressait le fourrage, préalablement haché par l'ensileuse, dans une gaine de film polyéthylène, fermée ultérieurement aux deux extrémités.

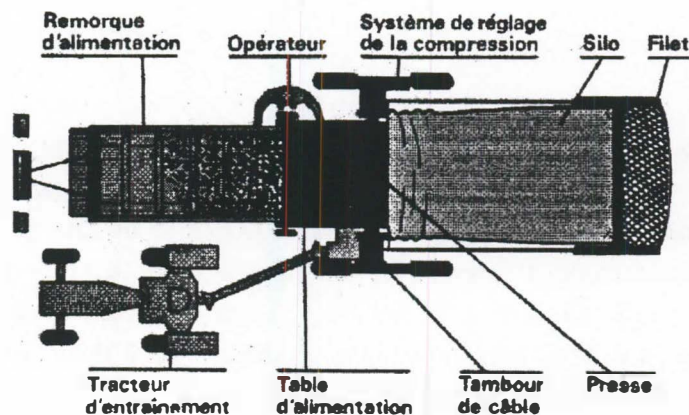


Figure A2 : Principe du silo-presse Kuhn (source : document Kuhn)

Balles cylindriques ou parallélépipédiques

Les balles de fourrage préfané ou mi-fané peuvent être soit mises en meule puis recouvertes d'une bâche plastique, soit mises en sacs plastiques, seules ou par deux (Thouroude, 1980 ; Gaillard, 1981, 1982). Récemment, la technique de l'enrubannage a permis de réaliser des progrès significatifs dans ce mode de conservation grâce à l'utilisation de film étirable en polyéthylène (Gaillard *et al.*, 1987, 1988, 1989, 1991 ; Gaillard, 1989 ; Cedra *et al.*, 1989 ; Morel d'Arleux *et al.*, 1989) ; les balles sont alors stockées individuellement, par deux ou en boudin selon l'enrubanneuse utilisée.

Coupe directe

Les récolteuses hacheuses chargeuses à fléaux en forme de cuillère (figure A3), ont été utilisées pour l'ensilage. Cependant, elles ont des performances limitées, tronçonnent le fourrage en brins moyens à longs et aspirent de la terre et des débris organiques souillant le fourrage (Cabon, 1979). Les ensileuses double-coupe (figure A4) munies d'un rotor à fléaux, généralement en forme de L, pour la fauche et d'un volant hacheur permettant de couper le fourrage en brins moyens et courts, sont plus performantes. La fauche à fléaux reste cependant facteur de contamination en terre. Les ensileuses à couteaux, outre leurs performances, hachent finement le fourrage grâce à leur tambour hacheur (figure A5), ce qui améliore les fermentations et l'ingestion par les animaux. Un tablier de coupe à doigts, ou le plus souvent à disques, fauche le fourrage proprement sans apport de terre en l'absence de taupinières.

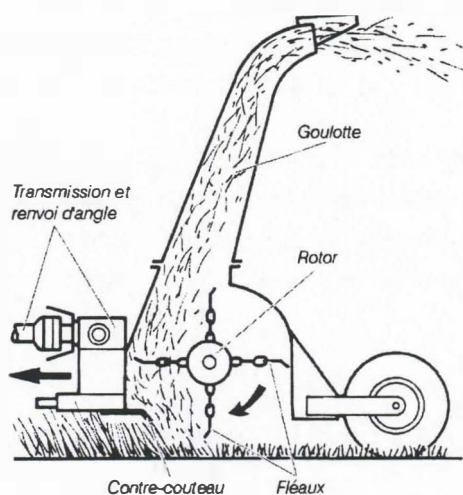


Figure A3 : Récolteuse - hacheuse - chargeuse à fléaux (source : CEMAGREF)

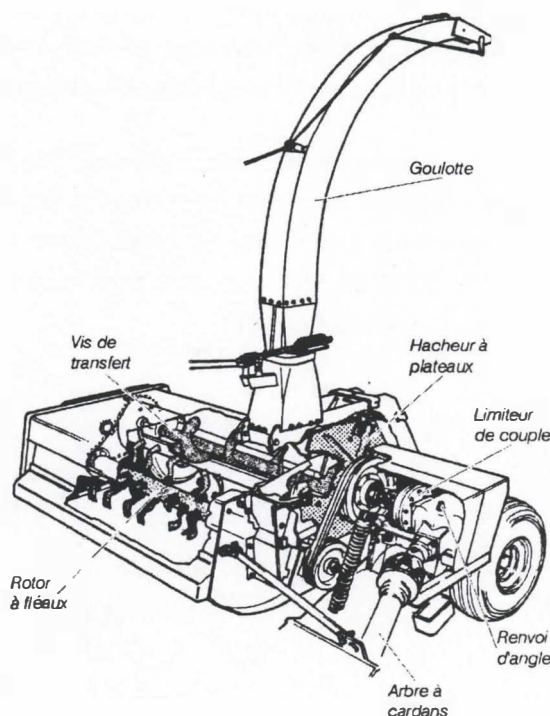


Figure A4 : Ensileuse trainée à double coupe (source : CEMAGREF)

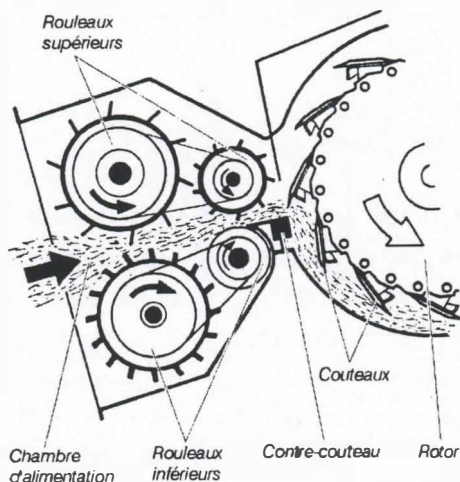


Figure A5 : Tambour hacheur d'une ensileuse à couteaux (source : CEMAGREF)

Ressuyage et préfanage

La reprise du fourrage, préalablement fauché, peut être réalisée avec une ensileuse, une remorque autochargeuse ou une presse, équipées d'un pick-up. Il est éventuellement possible de reprendre les andains avec les machines munies d'un rotor à fléaux, mais les performances sont limitées et les risques de bourrage importants. De plus, le fourrage est souillé par la terre ou les débris organiques.

Les ensileuses munies de couteaux sur tambour hacheur (figure A5) ou sur volant hacheur sont les machines les plus employées actuellement. Elles sont performantes (gros débit de chantier) et réalisent un hachage fin permettant de bien compacter les silos. La conservation est souvent excellente à condition de ne pas dépasser 45 % de MS ; au delà, l'ensilage peut être sujet à des fermentations aérobies car le tassage devient difficile. Ces machines sont polyvalentes car elle peuvent recevoir un tablier de coupe directe ou un cueilleur à maïs à la place du pick-up. L'inconvénient réside principalement dans l'organisation des chantiers qui nécessitent beaucoup d'équipements en tracteurs et remorques, et de la main d'oeuvre.

La remorque autochargeuse (figure A6) apporte de la souplesse dans la récolte, mais les chantiers sont peu performants, les parcelles ne doivent pas être éloignées du silo, et le tronçonnement est réalisé en brins longs, d'où une conservation plutôt difficile (Cotto, 1982). Au delà de 40 % de MS, la compaction du silo devient très difficile, les risques de détérioration aérobie sont donc augmentés.

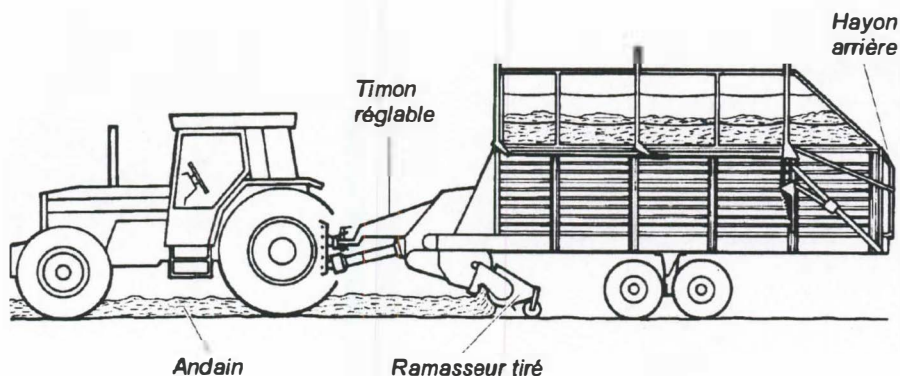


Figure A6 : Remorque auto-chargeuse au travail (source : CEMAGREF)

La presse permet de réaliser des balles de fourrages qui seront ensuite mises en meules, en sacs, enrubannées (figure A7) : technique récente de plus en plus utilisée. Le fourrage est récolté en brins entiers et comprimé dans la chambre de la presse de manière à chasser l'air ; certaines machines sont munies de couteaux permettant un tronçonnement (brins longs) (Gaillard, 1993ab). Compte tenu des risques de contamination en spores butyriques et en *Listeria*, il est recommandé d'atteindre une teneur de 40 à 45 % de MS (Andrieu *et al.*, 1992 ; Corrot, 1993). Il n'y a pas de limite supérieure, si ce n'est l'inutilité de préserver à l'abri de l'air un fourrage suffisamment sec pour être conservé à l'état de foin.

Utilisée principalement en métropole comme sécurité par rapport à la fenaïson, la technique des balles enrubannées est employée à La Réunion essentiellement pour l'ensilage. Son principal avantage est la souplesse dans l'organisation des chantiers et l'adaptation à la gestion du fourrage parcelle par parcelle (Corrot, 1993). La distribution de l'ensilage est également très souple, et la qualité de l'ensilage reste constante.

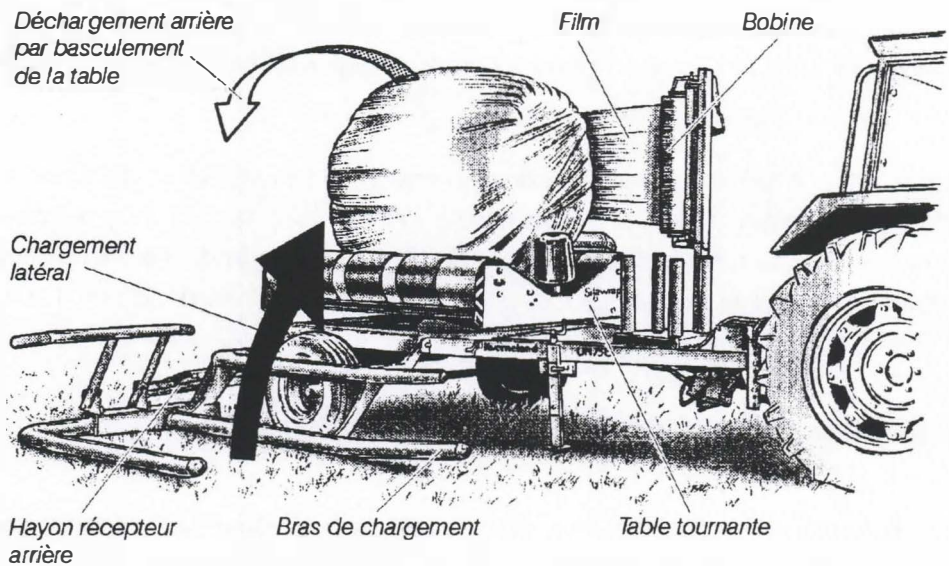


Figure A7 : Enrubanneuse autochargeuse à bras latéral et déchargement arrière
(source : CEMAGREF d'après document Kverneland)

Intérêt de l'ensilage par rapport à d'autres techniques de stockage

Tableau A1 : Atouts et handicaps de différentes techniques de récolte de l'herbe
(Morel d'Arleux, 1993)

	coupe fine ressuyée	auto chargeuse	balles enrubannées	foin
brins	courts	longs	entiers	entiers
seuils de MS minimum (%)	25	35	40	80
nombre minimum de jours au sol (j)	0.5	1.5	2	4
pertes totales	++	++	+/-	++
risque butyrique	+	++	+	-
souplesse d'utilisation	+/-	+	++	+/-
sécurité de récolte	++	+	+	-
aptitude à la conservation	+	+/-	+	++
facilité de distribution : mécanique	++	+/-	+/-	-
manuelle	+/-	-	+/-	+
besoin en main d'oeuvre (hommes)	4 - 6	2 - 3	2 - 3	1 - 2
débit de chantier (ha/jour)	6 - 15	3 - 7	2 - 5	2 - 4
coût des bâtiments et silos	++	++	-	+

Teneur en matière sèche à la fauche

La teneur en eau du fourrage dépend des conditions pédoclimatiques, de l'espèce, de la variété et du stade morphologique : lorsque la plante vieillit, sa teneur en eau diminue en relation avec l'augmentation de la proportion de tiges (Demarquilly, 1987), mais sa valeur nutritive diminue également rapidement. Une fertilisation azotée importante augmente la teneur en eau du fourrage (Wilman *et al.*, 1982).

La quantité d'eau à évaporer dépend du rendement fourrager et du stade végétatif ; Demarquilly (1987) montre que pour le ray-grass d'Italie, celle-ci est maximale à la mi-épiaison. Pour amener le fourrage à l'état de foin stable (80 % de MS), il faudra évaporer de 3 à 5 kg d'eau par kg de MS, selon la teneur en eau à la fauche. Le ressuyage correspond à l'évaporation de 1 à 3 kg d'eau par kg de MS, de 1.5 à 4 pour le préfanage.

Quelques aspects de la dessiccation du fourrage

La dessiccation se produit par les stomates et par la cuticule. Les stomates sont surtout présents à la surface des feuilles et régulent la transpiration des plantes. La transpiration par les stomates est 100 fois supérieure à la transpiration cuticulaire (Binet *et al.*, 1967, *in* : Demarquilly, 1987). Ils se ferment lorsque la plante est en état de stress hydrique.

Lorsque la plante est fauchée, la fermeture des stomates n'intervient qu'une heure après la fauche (Clark *et al.*, 1977, *in* : Jones, 1979). Si le temps est séchant, l'évaporation d'eau est très rapide. Cependant, la quantité évaporée ne représente que 20 à 30 % de l'eau présente au moment de la fauche (Harris *et al.*, 1980), ce qui correspond seulement au ressuyage.

Jones (1979) définit deux phases : une rapide correspondant à l'évaporation de l'eau libre entre les cellules et dans les vaisseaux, et une lente correspondant à l'évaporation de l'eau contenue dans les cellules (Demarquilly, 1987). Selon Jones (1979), les limbes se dessèchent beaucoup plus rapidement que les tiges et, de plus, ils participent à l'évaporation de l'eau des tiges, par transfert.

La vitesse de dessiccation d'un fourrage jeune, essentiellement feuillu, sera donc plus élevée. Lorsque les limbes sont complètement desséchés, l'eau des tiges est alors d'autant plus difficile à évaporer que ces tiges sont emprisonnées dans des gaines, c'est à dire juste avant l'émergence des épis. En pleine épiaison, la surface de tige libre (*i.e.* de tige non recouverte de gaines) est augmentée et les tiges se dessèchent plus rapidement. Cette observation, faite par Jones *et al.* (1981) est valable notamment pour les ray-grass. Par contre, la fétuque se dessèche beaucoup plus rapidement sans effet du stade morphologique ; cette graminée possède de nombreux stomates, une cuticule fine et abrasée par le frottement des feuilles, une proportion de talles végétatifs importante et une aptitude forte des limbes pour dessécher les tiges (Demarquilly, 1987).

L'énergie nécessaire au séchage provient du rayonnement solaire. Ce rayonnement agit sur la température, ce qui augmente alors le déficit de saturation. Il n'intervient directement que sur les premiers centimètres de fourrage ; en effet, le rayonnement à la base d'un andain de fourrage n'est que de 10 % du rayonnement net reçu au sommet de l'andain (Jones *et al.*, 1980).

L'humidité diminue le déficit de saturation. Le vent permet de renouveler l'air autour et dans l'andain et ainsi contribue à une meilleure évaporation de l'eau du fourrage (Jones *et al.*, 1980 ; Cabon, 1987).

La pluie ou la réhumidification par brouillard interviennent bien sûr en augmentant la durée de dessiccation, mais aussi les pertes (lessivage), notamment si le fourrage a été conditionné (Demarquilly, 1987). L'effet de la pluie sur les andains a été étudiée et modélisée par différents auteurs (Pitt *et al.*, 1990 ; Mc Gechan *et al.*, 1990, 1993).

Améliorations de la dessiccation du fourrage

Différentes techniques permettent d'améliorer le séchage du fourrage. Les procédés chimiques ou thermiques s'attaquant à la cuticule des plantes n'ont pour l'instant pas dépassé le stade expérimental (Cabon, 1987). Par contre, divers procédés mécaniques sont développés sur les machines de récolte.

Suivant directement la fauche, le conditionnement du fourrage vise soit à écraser les tiges par l'action de rouleaux adaptés aux légumineuses et aux graminées à grosses tiges, soit à lacérer le fourrage pour rayer la cuticule des tiges et feuilles des graminées par l'action d'un rotor muni de doigts (figure A8) ou de brosses en nylon (Gaillard, 1987). Ce type de conditionneur à rotor, forçant le fourrage sur des peignes ou un carter, occasionne plus de pertes pour les légumineuses. Les machines avec rotor de conditionnement présentent l'avantage de former des andains très aérés, le pied du fourrage se trouvant au dessus.

Le développement des faucheuses conditionneuses (figure A8) a donc permis de diminuer de 25 à 30 % le temps de séchage d'un foin (Höhn, 1981, *in* : Cabon, 1987). Le réglage des différentes machines, intervenant dans la technique de séchage du fourrage, doit être particulièrement soigné et précis, de manière à conduire la dessiccation le plus rapidement possible, tout en minimisant les pertes (Comet, 1977 ; Gaillard, 1987 ; Savoie, 1988).

La dessiccation peut être accélérée par deux opérations : l'éparpillage et le retournement d'andain (Casagrande, 1991). L'éparpillage (figure A9) du fourrage est surtout efficace s'il intervient peu de temps après la fauche, pour une teneur inférieure à 35 % de MS (Jones *et al.*, 1980 ; Pattey *et al.*, 1987). Il permet d'aérer le fourrage, de le retourner afin de sécher la partie inférieure de l'andain et n'est utile que par temps ensoleillé (Jones *et al.*, 1980 ; Cabon, 1987). Il permet alors d'augmenter notablement la vitesse de dessiccation, selon la densité des andains (Pattey *et al.*, 1987). En cas de ciel couvert, et à partir de 50 % de MS, il vaut mieux conduire la dessiccation en andains aérés, retournés plusieurs fois. L'andainage (figure A9) qui vise à regrouper le fourrage en andains homogènes est l'action qui précède la récolte, il n'agit pas ou peu sur la dessiccation. L'éparpillage ou le retournement des andains contaminent souvent les fourrages de terre. Ils doivent donc être évités pour l'ensilage sauf quand on vise une teneur en MS supérieure à 45 - 50 %.

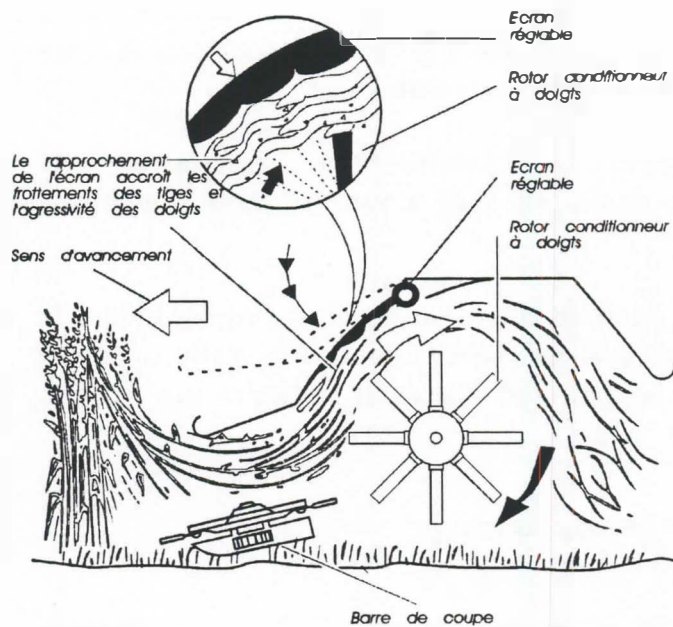


Figure A8 : Principe d'une faucheuse conditionneuse à doigts (source : CEMAGREF)

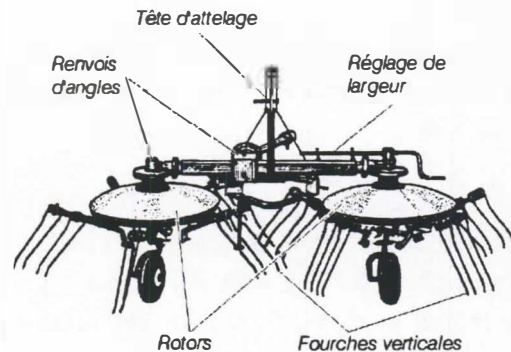


Figure A9 : Faneuse-andaineuse rotative à fourches verticales (source : CEMAGREF)

Micro-organismes fongiques

La plupart des micro-organismes fongiques sont aérobies stricts, cependant les levures et certaines moisissures peuvent se développer en conditions d'anaérobiose si l'énergie nécessaire à leur croissance n'est pas limitante (Deacon, 1980, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Ces micro-organismes sont inhibés par les acides gras volatils à longue chaîne (acides propionique, butyrique, valérique ...). Cette sensibilité explique la relative stabilité à l'ouverture des ensilages mal conservés. Pour préserver les bons ensilages de la dégradation aérobie, il est donc possible d'utiliser ces acides, notamment l'acide propionique pour l'ensilage de maïs ; mais la protection n'est pas complète, car des bactéries peuvent également initier la dégradation. La garantie la plus sûre réside donc principalement dans la vitesse d'avancement du front d'attaque (Demarquilly, 1979).

Levures

En conditions d'aérobiose, les levures sont souvent responsables, avec les bactéries acétiques, de l'initialisation de la détérioration des bons ensilages, car elles peuvent croître à des pH très bas. Elles utilisent les sucres résiduels, cas fréquent des ensilages préfanés, et l'acide lactique pour certaines d'entre elles, ce qui provoque une remontée du pH. Elles peuvent également dégrader d'autres acides organiques. Elles peuvent se développer à de faibles humidités, mais une humidité de surface leur est nécessaire : la condensation entre le film et l'ensilage réalise ces conditions.

Moisissures

Les moisissures se développent dans des conditions similaires à celles des levures, mais leur tolérance au pH bas est beaucoup plus faible et elles nécessitent une concentration en oxygène suffisante pour leur croissance. Cependant certaines espèces croissent sous des concentrations en CO₂ très élevées. Généralement, elles interviennent après les levures dans la cinétique de dégradation aérobie des ensilages (Ohyama *et al.*, 1977, *in* : McDonald *et al.*, 1991).

Autres bactéries

Certains *Bacillus* sporulés peuvent jouer un rôle dans la détérioration initiale des ensilages de céréales. Leur prolifération dépendrait du développement préalable de levures capables d'augmenter le pH à un niveau adéquat pour ces bactéries (Holden, 1987, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Les *Listeria*, principalement *Listeria monocytogenes*, qui sont pathogènes pour les animaux, particulièrement pour les ovins, sont des bactéries anaérobies facultatives. Elles sont absentes des ensilages bien fermentés (anaérobiose, chute rapide du pH). En effet, leur développement est fortement inhibé par les acides lactique, acétique et formique (Östling *et al.*, 1993). Par contre, lorsque les conditions d'anaérobiose ne sont pas parfaites, elles peuvent se développer, même à des pH bas, par manque de compétitivité de la flore lactique. C'est, entre autre, assez souvent le cas pour les balles rondes de faible densité, ensilées en sacs (Fenlon *et al.*, 1989). D'autres bactéries peuvent dégrader l'acide lactique en acide acétique (genres *Acetobacter*, *Gluconobacter*), ou en acide propionique (genre *Propionibacterium*, *Clostridium propionicum*) (Delwiche, 1948, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Les bactéries acétiques peuvent initier la détérioration des ensilages, notamment de maïs (Spoelstra *et al.*, 1988).

Influence des conditions de réalisation de l'ensilage sur les fermentations et sur la qualité de conservation

La disponibilité en glucides solubles influence directement les fermentations et leur orientation. Une libération rapide des contenus cellulaires par le hachage ou la lacération du fourrage permet d'accélérer l'acidification (Gouet, 1979a). Par ailleurs, tout en améliorant la qualité de conservation, la finesse de hachage augmente l'ingestion par les animaux (Dulphy *et al.*, 1981b). Le hachage facilite en outre le tassement. Celui-ci, souvent effectué par un tracteur sur le tas, a longtemps eu pour but de limiter l'entrée d'air dans le silo. Depuis l'apparition des films plastiques, son importance est moindre, bien qu'il permette d'ensiler plus de fourrage par m³ de silo, sauf pour les fourrages très préfanés épuisant lentement l'oxygène emprisonné dans le silo. Il ne doit jamais se faire au détriment de la rapidité d'exécution du chantier d'ensilage.

L'étanchéité du silo doit être réalisée rapidement, aussitôt après le remplissage, de manière à réduire le plus possible la phase respiratoire et le développement des bactéries aérobies. Elle doit être parfaite pour que les conditions d'anaérobiose nécessaire à la fermentation lactique soient remplies, en évitant les échanges gazeux. Pour cela, le film plastique doit être étanche, c'est à dire suffisamment épais : Lindgren *et al.* (1985) pense qu'un film de 100 µm n'est pas assez épais pour garantir une diffusion d'oxygène suffisamment faible afin d'inhiber le développement possible de certaines levures dégradant l'acide lactique.

Le film doit surtout être bien appliqué sur le fourrage (Cabon, 1979), chargé de terre ou sable pour limiter l'entrée d'air sur toute la surface du silo en cas où un trou surviendrait ; de même le film doit former un joint étanche sur tout le pourtour du silo (Demarquilly, 1979). Dans le cas des balles enrubannées, il faut veiller à l'application rigoureuse de 4 couches d'un film étirable de qualité sur toute la balle, et veiller à ne pas endommager l'enveloppe lors des manipulations de stockage (Gaillard *et al.*, 1989).

La rapidité du chantier est également importante. Il est nécessaire de disposer de machines dont les performances correspondent à la taille des silos : un chantier doit être terminé si possible en une journée (Demarquilly, 1979). Ciotti *et al.* (1989) a montré l'influence d'un retard d'enrubannage sur la qualité de conservation d'ensilage de luzerne récoltée à 30 % de MS (augmentation de la température, de la quantité d'ammoniac et d'acide butyrique dans l'ensilage).

L'apport de terre dans le silo est une source de contamination en germes butyriques, il est donc à éviter. Les récolteuses à fléaux sont de ce point de vue à proscrire, car le rotor de coupe et hachage aspire des débris végétaux et de la terre. Des conditions climatiques pluvieuses augmentent la teneur en eau et provoquent des souillures par la terre, néfastes à une fermentation adéquate (Cabon, 1979). Du point de vue de l'apport de terre, une attention particulière doit être apportée pour le remplissage et le tassement du silo : les bennes doivent être déchargées devant le silo, sur aire bétonnée de préférence, et un autre tracteur (roues propres) étale le fourrage et le tasse.

Incorporation de produits nutritifs

L'intérêt de l'addition d'azote non protéique est d'améliorer la valeur azotée du fourrage conservé, principalement le maïs (Lessard *et al.*, 1978, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Néanmoins, la stabilité à l'ouverture peut être accrue grâce à ces apports (Glewen *et al.*, 1982, *in* : McDonald, 1991). L'addition d'urée ou d'ammoniac ralentit l'acidification, il en résulte un pH plus élevé ; elle n'est satisfaisante que sur du maïs suffisamment riche en glucides solubles et pour une teneur en MS de l'ordre de 28 à 32 % (Demarquilly, 1979). L'incorporation de minéraux peut être envisagée pour compléter les fourrages déficients. Toutefois, cet apport ne doit pas gêner la flore lactique, conduisant alors à des ensilages de type butyrique (Cilliers *et al.*, 1976, *in* : McDonald *et al.*, 1991). En fait, il vaut souvent mieux apporter ces différents compléments nutritifs à l'auge lors de la distribution de l'ensilage.

Incorporation de produits absorbants

L'objectif de ces apports est de réduire les effluents dans le cas des fourrages riches en eau récoltés en coupe directe. Des produits fibreux secs tels que la paille (Kota, 1989) ou la bagasse de canne à sucre peuvent être employés. Ils réduisent la valeur nutritive de l'ensilage tout en augmentant la qualité de conservation ; leur incorporation doit donc se faire en quantité modérée. Pour la conservation d'ensilage de légumineuses, Singh *et al.* (1984) a noté l'intérêt de l'adjonction de produits absorbants (paille de riz ou de blé, bagasse de canne à sucre), associée avec de la mélasse pour compenser la faible teneur en glucides solubles des légumineuses.

L'addition de céréales ou de pulpe déshydratée permet, quant à elle, de réduire les effluents tout en augmentant les valeurs nutritives, l'avantage de la pulpe étant comparativement d'améliorer la digestibilité et l'ingestibilité de l'ensilage (Demarquilly, 1979). Jones *et al.* (1990) conclut à l'intérêt bénéfique d'une incorporation d'orge par rapport à un ensilage réalisé avec acide formique : qualité de conservation et performances des animaux comparables, mais réduction des pertes par jus dans le cas de l'ensilage additionné d'orge.

Qualité de conservation des ensilages

De par l'action des enzymes et des micro-organismes, l'ensilage est un procédé de conservation qui modifie les caractéristiques chimiques des fourrages.

Selon Demarquilly (1979), l'ammoniac est présent dans tous les ensilages puisqu'il résulte de l'action de bactéries coliformes et que les bactéries lactiques en produisent aussi un peu à partir de la serine et de l'arginine. Sa présence en quantité importante : proportion de l'azote total supérieure à 10 %, incombe plutôt au développement de la flore butyrique, et protéolytique pour des taux très élevés.

L'acide acétique est également toujours présent car il résulte de l'activité des bactéries coliformes, mais aussi des bactéries lactiques hétérofermentaires et quelquefois homofermentaires (fermentations de certains sucres ou acides organiques). Une quantité importante d'acide acétique indique cependant une acidification plus lente. Elle est le plus souvent associée avec la production d'acide butyrique.

Le développement de la flore butyrique est mis en évidence par la présence d'acide butyrique en quantité plus ou moins importante, les autres acides gras volatils proviennent du développement des *Clostridium* protéolytiques.

La présence d'alcools peut signifier un développement de levures (cas de la canne à sucre) ou résulter d'une fermentation lactique hétérofermentaire (Sauvant *et al.*, 1979), quelquefois homofermentaire sur certains sucres ou acides organiques. Elle est constatée sur des ensilages humides et très riches en glucides solubles.

La quantité d'acide lactique présente dans les ensilages est, quant à elle, très variable. Elle dépend du type de fourrage, de sa teneur en glucides solubles et en MS, et de l'emploi de conservateurs : une teneur élevée indique une bonne fermentation lactique, mais une faible teneur ne signifie pas forcément un ensilage mal conservé.

Les ensilages préfanés sont moins fermentés, les produits issus des dégradations sont donc en quantité moindre ; cependant une réduction des glucides solubles et des protéines, ainsi qu'une redistribution des composés azotés peuvent être notées, particulièrement lorsque le préfanage est lent et réalisé dans de mauvaises conditions météorologiques (Brady, 1960 ; Carpintero *et al.*, 1979, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Les ensilages préservés avec des conservateurs (acides ou bactériostatiques) sont également peu fermentés, leur composition chimique est peu modifiée.

Ensilage et alimentation des ruminants

Contaminations microbiennes

La présence de spores butyriques (*Clostridium tyrobutyricum*) dans les ensilages indique une contamination par la terre ou l'épandage d'effluents d'élevage. Elle résulte bien sûr également du développement de la flore bactérienne dans les ensilages mal conservés. Les ensilages présentant un nombre élevé de spores butyriques ($\text{NPP}^{47} > 1000 \text{ g}^{-1} \text{ MV}$) présente des risques de contamination du lait car ces spores se retrouvent dans les fèces qui vont ensuite contaminer la mamelle, l'hygiène de la traite est alors particulièrement importante (Gouet, 1979b). Les spores présentes dans le lait interdisent les fabrications fromagères à base de pâte cuite (de type gruyère) car leur développement provoque l'éclatement des meules de fromages.

Certaines bactéries et moisissures sont pathogènes pour les animaux (Meissonnier *et al.*, 1979). Les *Clostridium* protéolytiques peuvent provoquer des intoxications alimentaires par la présence d'amines toxiques lorsque l'état de putréfaction du fourrage est très avancé. *Clostridium botulinum*, responsable de l'intoxication botulique, peut être présent dans les ensilages ; mais la production de toxines est rare, et se produit dans des conditions mal identifiées. Le développement des *Listeria* peut survenir lorsque le pH est supérieur à 4.2 dans le cas d'ensilage mal étanchéifiés. Ces bactéries peuvent provoquer des méningo-encéphalites et des avortements chez les bovins mais surtout chez les ovins. Leur développement s'effectuant surtout dans le pourtour du silo, un tri de l'ensilage avant distribution peut s'avérer nécessaire pour réduire les risques d'intoxication (Fenlon *et al.*, 1989). La contamination fongique, provoquant des mycoses et mycotoxicoses, peut également survenir principalement lors de la reprise de fermentation à l'ouverture. Un tri du fourrage contaminé est nécessaire.

Incidences sur la valeur alimentaire et l'ingestion

La teneur en énergie brute des ensilages bien conservé est légèrement augmentée par rapport au fourrage vert (pertes en MS sans pertes concomitantes d'énergie + production d'alcools). Andrieu et Demarquilly (1987) donnent des équations, permettant de calculer l'énergie brute des ensilages en fonction du pH et des matières azotées totales : ils notent une augmentation d'énergie brute de 5.6 % pour les ensilages de graminées en coupe directe, de 3 % pour les ensilages préfanés et de 2.6 % pour l'ensilage de maïs.

La digestibilité de la matière organique est très peu modifiée (McDonald *et al.*, 1991). Elle peut être diminuée soit par les pertes de constituants les plus digestifs dans les jus dans le cas de fourrages très humides et très digestibles, soit par un apport excessif de formol réalisé pour conserver l'ensilage, ou par un préfanage supérieur à 30 - 35 % MS (Dulphy, 1979). La digestibilité des ensilages mal conservés ne semble pas plus faible que celle des bons ensilages ; néanmoins, la présence en grande quantité d'acides acétique et butyrique pourrait diminuer l'efficacité de l'énergie (Givens *et al.*, 1993). En résumé, la valeur de l'ensilage dépendra donc en priorité de la valeur du fourrage vert récolté (espèce, stade).

⁴⁷ Nombre le Plus Probable de spores de *Clostridium tyrobutyricum*, méthode de dénombrement (C.N.E.R.N.A., 1986)

L'ingestion d'ensilage provoque une libération rapide d'ammoniac dans le rumen, ce qui nécessite une complémentation en glucides fermentescibles (sucres, amidon), de manière à améliorer la synthèse des protéines microbiennes ; cette complémentation est encore plus nécessaire pour les fortes teneurs en ammoniac des ensilages mal conservés (Thomas *et al.*, 1985). Si la quantité d'ammoniac produit dans le rumen dépasse la capacité de protéosynthèse des micro-organismes (qui dépend de la quantité d'énergie dont ils disposent), l'ammoniac en excès passe dans le sang, est transformé en urée dans le foie, urée qui va être en partie excrétée dans les urines, ce qui constitue une perte importante pour l'animal (Ohshima *et al.*, 1978), même dans le cas d'ensilages bien conservés mais stockés sur une longue période (Fujita, 1976). La valeur azotée des ensilages est en définitive très liée à la qualité de conservation (Dulphy, 1979 ; Andrieu *et al.*, 1992). Une complémentation adaptée en fonction de la qualité de conservation devra donc être proposée aux animaux recevant de l'ensilage : farine de poisson, graines de soja, protéines tannées (Thomas *et al.*, 1989 ; Andrieu *et al.*, 1992).

Hormis les modifications de valeurs alimentaires liées à la technique d'ensilage, l'état de conservation a des répercussions très importantes sur l'ingestibilité (Dulphy *et al.*, 1981b) (tableau A2). Tous les ruminants sont sensibles à la qualité de conservation de l'ensilage et diminuent leur ingestion lorsque cette qualité diminue (Dulphy, 1979 ; Desvals, 1992) ; l'emploi de conservateurs efficaces ira donc dans le sens d'une augmentation de l'ingestion. Les bovins sont particulièrement sensibles à la qualité de conservation et notamment à la teneur en acide acétique. De plus, l'ingestion augmente avec la finesse de hachage ; elle augmente également avec la teneur en MS ; la présence de terre diminue les quantités ingérées de 10 % chez le mouton (Dulphy *et al.*, 1981b).

Tableau A2 : Ingestibilité relative ($\times 100$) des ensilages d'herbe par rapport aux fourrages verts de départ (Dulphy *et al.*, 1981b)

teneur en MS	brins longs		brins courts	
	sans conservateur	avec conservateur	sans conservateur	avec conservateur
17	68	78	80	92
20	72	81	85	96
23	76	85	90	100
32	89	92	97	102
35	94	97	100	103

Pertes en cours de dessiccation

Lors d'une coupe directe, il n'y a pas de pertes au champ, si ce n'est par les machines : hauteur de coupe, pertes de chargement. Par contre, lors de la dessiccation, cas des ensilages ressuyés ou préfanés, les pertes interviennent dès la fauche. Globalement, les pertes lors de la dessiccation du fourrage se traduisent par une diminution de la quantité de MS. Mais les pertes se traduisent également par une diminution de la valeur nutritive du fourrage car elles concernent les éléments solubles de la plante qui sont très digestibles et car elles réduisent la proportion de feuilles, plus riches, dans la récolte (notamment pour les légumineuses).

Tant que la plante est vivante la respiration due à l'action des enzymes demeure (Wood *et al.*, 1971). Elle résulte dans une combustion de sucres solubles, ce qui réduit l'aptitude du fourrage à l'ensilage. Pour atteindre une teneur en MS correspondant à un foin stable (80 % de MS), les pertes par respiration sont de l'ordre de 5 à 8 % de la matière sèche initiale (Demarquilly, 1987 ; Dulphy, 1987), mais elles peuvent atteindre 20 % si les conditions climatiques sont défavorables, avec une diminution principalement des fructosanes (Melvin *et al.*, 1963). L'intensité des pertes de MS est d'autant plus élevée que le fourrage est humide et que la température ambiante est élevée (Parke *et al.*, 1978, *in* : Demarquilly, 1987), ce qui est le cas à La Réunion. Par ailleurs, le conditionnement du fourrage, qui occasionne des blessures, augmente la respiration (Roberts, 1951, Urtani *et al.*, 1980, *in* : McDonald *et al.*, 1991). La valeur nutritive du fourrage est donc affectée par la dessiccation. Cependant, la durée de dessiccation nécessaire au ressuyage ou au préfanage étant réduite, les pertes par respiration demeurent beaucoup plus faibles que pour le foin.

La protéolyse modifie la composition azotée de la plante dans les premières heures de la dessiccation : une fraction des protéines insolubles est dégradée en azote soluble (Demarquilly, 1987). Cette action enzymatique peut être très variable (Macpherson, 1952 ; Melvin *et al.*, 1963). Il peut en résulter une perte de MS sous forme de CO₂ et NH₃.

Les différentes opérations de fauche, conditionnement, fanage, andainage et récolte occasionnent des pertes mécaniques, particulièrement importantes dans le cas des légumineuses car les feuilles se détachent facilement. Pour les graminées, lors d'une fenaison complète, les pertes mécaniques sont de l'ordre de 2 à 5 % de MS (Gerlach, 1929, *in* : Demarquilly, 1987). Cependant, lors du ressuyage ou du préfanage, les pertes mécaniques sont considérablement diminuées car le fourrage est travaillé humide : moins de 1% de MS (Dulphy, 1987).

La pluie est un facteur important de pertes puisqu'elle entraîne des éléments nutritifs (sucres, composés azotés, minéraux) par lessivage. Les pertes sont d'autant plus élevées que la pluie intervient sur un fourrage plus sec, elles sont souvent proportionnelles à l'intensité de la pluie (Parke *et al.*, 1978, *in* : Dulphy, 1987). Différents auteurs ont modélisé l'action de la pluie sur un fourrage en cours de dessiccation (Thompson, 1981 ; McGeachan *et al.*, 1990, 1993 ; Pitt *et al.*, 1990). Les pertes par lessivage sur un fourrage conditionné sont plus importantes.

Pertes lors de la fermentation

Les pertes sous formes de gaz (CO_2 , CH_4 , NH_3 , H_2) proviennent de la respiration, de la fermentation et des reprises de fermentation à l'ouverture. Pour les ensilages bien conservés, notamment avec l'emploi de conservateurs efficaces, les pertes de MS peuvent être très réduites : 0.27 % de MS dans le cas de silo rempli rapidement et bien étanchéifié (McDonald *et al.*, 1973, *in* : McDonald *et al.*, 1991). Elles peuvent être très importantes et largement dépasser 5 % de MS dans le cas d'une fermentation butyrique ou lorsque le silo est peu étanche. Par contre les pertes d'énergie correspondantes sont faibles (Demarquilly, 1979).

Les pertes à l'ouverture sont, quant à elles, très variables selon la vitesse d'avancement du front, la température extérieure, la teneur en MS et la qualité de conservation de l'ensilage (Cabon, 1979). Elles représentent de 2 à 8 % de MS, mais peuvent être considérables pour des ensilages mi-fanés et mal tassés. Honig (1991) donne des pertes allant jusqu'à 30 % de MS par oxydation lors de la distribution ; cette oxydation, correspondant le plus souvent à une vitesse d'avancement insuffisante, est associée à une élévation importante de température.

La teneur en MS et la hauteur du silo conditionnent les pertes par jus (il y a en moyenne 60 à 70 g de MS par litre de jus), la perte de MS peut atteindre 10 % dans le cas d'ensilages très humides (McDonald *et al.*, 1991). Ces jus contiennent des minéraux, des glucides solubles au début de la fermentation, de l'azote soluble et des acides organiques, notamment lactique. Les pertes par effluents sont très importantes pour un ensilage dont la teneur en MS est inférieure à 20 %, elles deviennent très faibles au delà de 25 % de MS (Miller *et al.*, 1965, Bastiman *et al.*, 1985, *in* : McDonald *et al.*, 1991).

Les pertes par jus interviennent principalement dans les premiers jours suivant le remplissage du silo, elles disparaissent ensuite si l'ensilage présente une teneur en MS supérieure à 20 %, mais se maintiennent avec un faible débit sur une longue période pour les ensilages très humides (Bastiman, 1976, *in* : McDonald *et al.*, 1991).

Pertes à la distribution

Les pertes à la distribution correspondent essentiellement à l'ensilage inconsommable, soit éliminé par l'agriculteur au silo, soit refusé dans l'auge par les animaux. Ces pertes sont très variables : de 0 à 20 % de MS selon le type de silo, les défauts d'étanchéité et la teneur en MS de l'ensilage (Demarquilly, 1979). Elles se présentent sous forme de moisissures en surface ou à l'endroit de l'entrée d'air pour les ensilages secs, ou sous forme d'une couche noire plus ou moins épaisse correspondant à la détérioration initiale de l'ensilage résultant d'une fermeture différée du silo ou d'un défaut d'étanchéité du film plastique.

ANNEXE B

**Caractéristiques principales des fourrages
cultivés dans les Hauts de La Réunion
et conditions de dessiccation**

Le dactyle (*Dactylis glomerata*)

Caractéristiques générales

Le dactyle est une graminée perenne qui s'enracine profondément avec des racines puissantes se renouvelant tous les deux ans. Très résistant à la sécheresse, il répond bien à la fertilisation azotée et s'adapte à différents types de sols. Cependant, son installation est un peu délicate, la germination est difficile et les plantules démarrent lentement (Gilibert, 1981 ; Bigot, 1991). Aussi, faut-il préparer un lit de semences fin, régulier et bien rappuyé (Paillat, 1986 ; Paillat *et al.*, 1988), notamment sur les andosols très légers des Hauts de l'île (Perret, 1992). L'utilisation d'outils d'affinage à dents et du semoir sur cultipacker, Rollosem, donne satisfaction. Cet itinéraire d'implantation est maintenant pratiqué dans l'ensemble de l'île grâce au travail de l'Union des A.F.P.. Le dactyle a la faculté de s'étendre par resemis. Sa pérennité est très bonne.

Les quantités produites, 15 t MS ha^{-1} (13.3 à 17.9), sont presque équivalentes à celles du kikuyu dans un même site (S.E.D.A.E.L., 1200 m), avec des croissances journalières identiques entre la saison chaude et la saison froide, pour une pluviométrie hivernale suffisante (Gilibert, 1981). A une altitude supérieure (1300 m, Hauts de l'Ouest), Bigot *et al.* (1991) trouve 12 t MS ha^{-1} (9.8 à 14.1) avec une baisse de croissance de 45 % en hiver (33 % pour le kikuyu).

Analyses chimiques

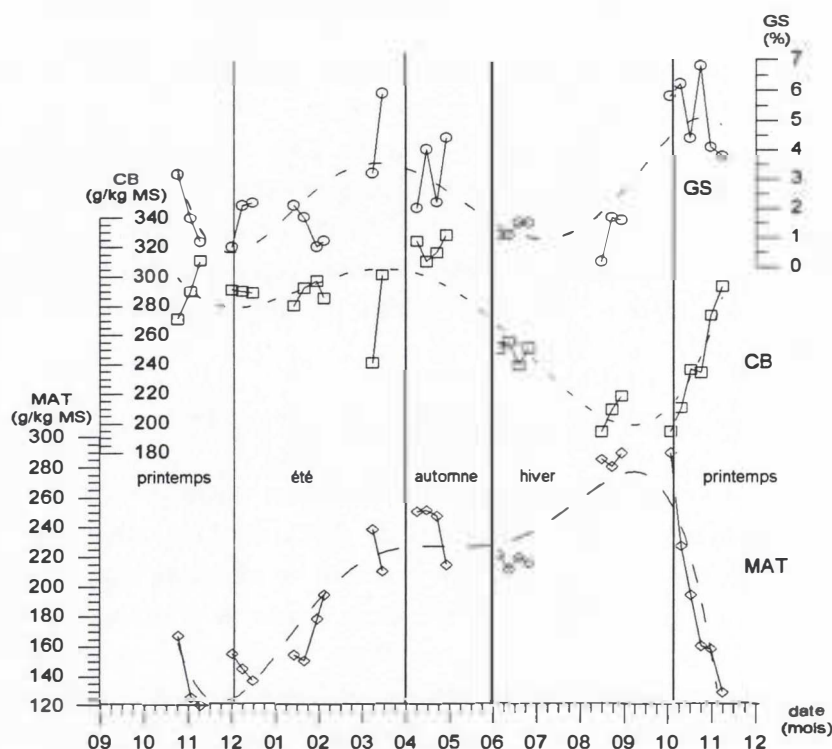


Figure B1: Evolution, selon la saison, des teneurs en matières azotées totales (MAT), en cellulose brute (CB) et en glucides solubles (GS) de *Dactylis glomerata*, à la Plaine des Cafres (1600 m), d'après les données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989 (les motifs reliés par des traits pleins correspondent aux semaines de repousse, à partir de la 3^{ème} semaine)

Tableau B1 : Composition chimique, selon la saison, de *Dactylis glomerata* récolté entre 21 et 42 jours de repousse à la Plaine des Cafres (1600 m), d'après les données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989

saisons	décembre à mars	avril mai	juin à septembre	octobre novembre	signif. F
MS (%)	16.0	14.6	14.9	17.0	ns
MAT (g kg ⁻¹ MS)	173 ^a	240 ^b	246 ^b	207 ^{ab}	*
CB (g kg ⁻¹ MS)	285 ^b	319 ^c	231 ^a	229 ^a	***
MM (g kg ⁻¹ MS)	109	94	99	107	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001
les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil $p < 0.05$

Teneur en MS (exprimée en %)

Gilibert (S.E.D.A.EL., 1981) donne une teneur de 15.5 % pour un âge de repousse de 60 jours et de 20 % à 80 jours. Selon Bigot *et al.* (Petite France, 1991), la teneur en MS varie de 15.8 en été à 21.2 % en hiver pour une exploitation à 38 et 60 jours, respectivement. En ce qui concerne l'essai conduit par Brunschwig (tableau B1), la teneur moyenne est de 17.3 % (13.8 à 21.1). Entre 21 et 42 jours de repousse, les effets âge et saison ne sont pas significatifs. Ces teneurs sont comparables à celles obtenues en métropole : 16.1 % (Demarquilly *et al.*, 1980).

Teneur en matières azotées totales (MAT exprimée en g kg⁻¹ MS)

D'après l'essai conduit à la Plaine des Cafres (figure B1, tableau B1), pour du dactyle récolté jeune, cette teneur varie en cours d'année ($p = 0.05$) ; mais la variation selon l'âge n'est pas significative entre 21 et 42 jours de repousse. Lors de cet essai, le début épiaison du dactyle est intervenu en hiver à 50 jours de repousse environ. Gilibert (1983) trouve des valeurs identiques quelle que soit la saison pour du dactyle cultivé à 1200 m : MAT = 175 à 200 g kg⁻¹ MS pour 50 à 60 jours de repousse. Ces différentes valeurs sont comparables à celles rapportées pour la métropole : MAT = 183 g kg⁻¹ MS sur des repousses feuillues de 2nd cycle (Demarquilly *et al.*, 1980).

Teneur en cellulose brute (CB exprimée en g kg⁻¹ MS)

Gilibert (1981) trouve une teneur moyenne en cellulose brute de 300 à 330 g kg⁻¹ MS pour, respectivement, 60 et 80 jours de repousse. Le tableau B1, concernant l'essai à la Plaine des Cafres conduit par Brunschwig, montre un effet très hautement significatif de la saison sur cette teneur pour du dactyle récolté jeune (stade feuillu) : on note des teneurs faibles de juin à novembre, proches d'un dactyle récolté au 1^{er} cycle en métropole. Par contre, les valeurs croissent rapidement à partir de décembre pour être maximales en fin de saison des pluies (pour l'année et le site étudiés) ; elles sont alors supérieures à un dactyle récolté au 2nd cycle en métropole : CB = 288 g kg⁻¹ MS (Demarquilly *et al.*, 1980).

Teneur en matières minérales (MM exprimée en g kg⁻¹ MS)

Les teneurs en matières minérales semblent plus faibles que celles de métropole pour des stades équivalents : MM = 115 à 130 g kg⁻¹ MS (Demarquilly *et al.*, 1980). Ceci doit être mis en relation avec des teneurs faibles en calcium et surtout en phosphore (Gilibert, 1983). Les variations de la teneur en MM selon la saison ou l'âge de repousse ne sont pas significatives.

Valeurs alimentaires

Gilibert (1981) donne des valeurs UFL moyennes sur l'année de 0.62 à 0.69 pour un âge de repousse de 80 et 60 jours, respectivement. A 60 jours, en saison froide, cette valeur atteint 0.85 UFL, alors qu'en saison chaude elle est de 0.69 pour un stade proche de la floraison. Gilibert (1983) note que ces valeurs sont proches de celles obtenues en pays tempérés. La valeur azotée est excellente : PDIN = 119 à 138 g kg⁻¹ MS et PDIE = 115 à 123 g kg⁻¹ MS.

D'après l'essai conduit par Brunschwig en 1988 et 1989 (Plaine des Cafres, 1600 m), il semble que la variation saisonnière soit importante (tableau B2) sur des repousses jeunes (21 à 42 jours). En effet, les valeurs nutritives décroissent en hiver : UFL = 0.97 à 0.80 et UFV = 0.90 à 0.75, PDIN = 165 à 80 g kg⁻¹ MS et PDIE = 140 à 95 g kg⁻¹ MS pour, respectivement, 21 et 52 jours de repousse (début épiaison). En été, les valeurs sont plus faibles mais décroissent peu, du moins jusqu'à 42 jours, la récolte ayant eu lieu à cet âge : UFL = 0.87 et UFV = 0.79, PDIN = PDIE = 110 g kg⁻¹ MS.

Tableau B2 : Valeurs alimentaires, selon la saison, de *Dactylis glomerata* récolté entre 21 et 42 jours de repousse à la Plaine des Cafres (1600 m), d'après les données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989

saisons	décembre à mars	avril mai	juin à septembre	octobre novembre	signif. F
UFL (kg ⁻¹ MS)	0.86 ^a	0.86 ^a	0.93 ^b	0.92 ^b	*
UFV (kg ⁻¹ MS)	0.79 ^a	0.78 ^a	0.86 ^b	0.89 ^b	**
PDIN (g kg ⁻¹ MS)	101 ^a	140 ^b	155 ^b	131 ^b	*
PDIE (g kg ⁻¹ MS)	102 ^a	118 ^{ab}	134 ^b	123 ^b	*

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil $p < 0.05$

Le ray-grass anglais ou RGA (*Lolium perenne*)

Caractéristiques générales

Cette graminée perenne, à enracinement superficiel, s'établit très facilement : rapidité de germination, grande faculté de tallage. Elle colonise des sols ayant une bonne capacité de rétention en eau et ne supporte pas la sécheresse ainsi que les fortes chaleurs (A.C.T.A., 1987). Le ray-grass anglais est bien adapté aux sols riches et valorise très bien la fertilisation. Son installation est plus facile que celle du dactyle. Néanmoins, elle nécessite un lit de semences suffisamment fin et surtout bien rappuyé (Paillat, 1986 ; Paillat *et al.*, 1988). En conditions favorables, sa pérennité est bonne (4 à 10 ans). Les animaux consomment très bien le ray-grass anglais lorsqu'il est au stade feuillu. Ses tiges durcissent lentement, il peut donc être exploité à un stade plus tardif que les autres graminées tempérées (dactyle, fétuque). Cette plante est sensible à la rouille, elle est alors très mal acceptée par les animaux (G.N.I.S., 1983).

Graminée peu répandue à La Réunion, peu de données sont disponibles sur son potentiel fourrager. Pour les saisons fourragères 1987 et 1988, Bigot *et al.* (1991) trouve un rendement voisin de 16 t MS ha⁻¹ en 7 exploitations dans les Hauts de l'Ouest (Petite-France, 1300 m). Sur cet essai, le ray-grass anglais a été, des graminées installées, la plante la plus productive et régulière dans l'année ; la baisse de production en hiver a été inférieure à 20 % (45 % pour le dactyle, 33 % pour le kikuyu). Cependant, ces données n'ont été établies que sur deux ans, car la saison sèche de 1988 a détruit la prairie âgée seulement de 2 ans.

Analyses chimiques

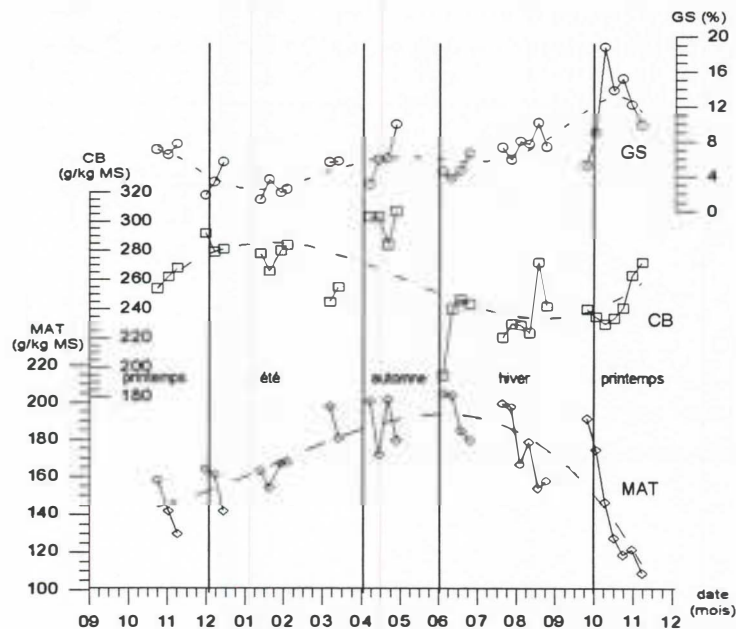


Figure B2 : Evolution, selon la saison, des teneurs en matières azotées totales (MAT), en cellulose brute (CB) et en glucides solubles (GS) de *Lolium perenne*, à la Plaine des Cafres (1600 m), d'après les données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989 (les motifs reliés par des traits pleins correspondent aux semaines de repousse, à partir de la 3^{ème} semaine)

Tableau B3 : Composition chimique, selon la saison, de *Lolium perenne* récolté entre 21 et 42 jours de repousse à la Plaine des Cafres (1600 m), d'après les données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989

saisons	décembre à mars	avril mai	juin à septembre	octobre novembre	signif. F
MS (%)	16.8	14.1	16.6	18.3	ns
MAT (g kg ⁻¹ MS)	166 ^a	189 ^b	190 ^b	152 ^a	**
CB (g kg ⁻¹ MS)	273 ^b	299 ^c	230 ^a	238 ^a	***
MM (g kg ⁻¹ MS)	102	90	99	93	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 5% ; ** = significatif au seuil 1% ; *** = significatif au seuil 0.1%

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil $p < 0.05$

Teneur en MS (exprimée en %)

Bigot (1991) donne des teneurs moyennes en MS variant de 20 % en été à 23 % en hiver pour du RGA récolté à 1300 m dans les Hauts de l'Ouest. Cette teneur est inférieure à la Plaine des Cafres, région plus humide : en moyenne 17 % (12.8 à 21.9) pour du RGA récolté jeune. A ce stade (21 à 42 jours de repousse), il n'y a pas d'effet significatif de l'âge ou de la saison. La teneur en MS est légèrement supérieure à celle du dactyle sur le même site.

Teneur en matières azotées totales (MAT en g kg⁻¹ MS)

D'après les données de Brunschwig (1988-1989), il n'y a pas d'effet significatif de l'âge (21 à 42 jours). Par contre, pour ce stade de récolte jeune, l'effet saison est hautement significatif (tableau B3). Cependant ces variations sont à pondérer par l'année et le site : par exemple une teneur en MAT de 208 g kg⁻¹ MS a été obtenue avec du RGA récolté à un stade jeune à la Plaine des Cafres (1500 m) en octobre 1992. Avant que le stade début épiaison ne soit atteint, les valeurs de MAT décroissent en hiver et printemps (juin à novembre) : MAT = 200 à 110 g kg⁻¹ MS pour 21 et 63 jours de repousse, respectivement (figure B2). En été et automne (décembre à mai), les valeurs seraient plus stables : MAT = 180 à 170 g kg⁻¹ MS pour 21 et 42 jours, respectivement, la récolte ayant eu lieu avant le début épiaison. Ces valeurs semblent un peu plus élevées que celles rapportées par Demarquilly *et al.* (1980) pour du RGA de métropole au stade feuillu : MAT = 166 g kg⁻¹ MS. La valeur au stade début épiaison paraît, quant à elle, comparable au RGA de La Réunion récolté à 63 jours de repousse (MAT = 110 g kg⁻¹ MS).

Teneur en cellulose brute (CB exprimée en g kg⁻¹ MS)

Pour un stade de récolte jeune (21 à 42 jours), l'effet saison est très hautement significatif sur la teneur en cellulose brute : les saisons été et surtout automne (avril - mai) présentent des teneurs beaucoup plus élevées (tableau B3). Par contre, il n'y a pas de signification pour l'effet âge de la repousse. Cependant, en hiver et printemps (juin à novembre), cette teneur semble croissante (moyenne de 3 ou 4 valeurs) : CB = 220 à 270 g kg⁻¹ MS pour 21 et 63 jours de repousse, respectivement (figure B2).

En été et automne (décembre à mai) la teneur est plus élevée et varie peu : CB = 270 à 290 g kg⁻¹ MS pour 21 et 42 jours de repousse, respectivement. Ces valeurs semblent comparables aux données métropolitaines en hiver et au printemps : CB = 230 à 260 g kg⁻¹ MS (Demarquilly *et al.*, 1980). Par contre, les teneurs observées à La Réunion en été et automne, à stade comparable, sont plus élevées.

Teneur en matières minérales (MM exprimée en g kg⁻¹ MS)

Comme pour le dactyle, à stade équivalent, la teneur en cendres est légèrement inférieure à celle donnée pour la métropole (Demarquilly *et al.*, 1980) : MM = 97 à 122 g kg⁻¹ MS (tableau B3). Les effets âge de repousse et saison ne sont pas significatifs sur cette teneur pour du RGA jeune.

Valeurs alimentaires

D'après les données de Brunschwig (1988 - 1989), les valeurs énergétiques semblent peu variables selon la saison et l'âge de la repousse compris entre 21 et 42 jours (tableau B4).

Par contre, pour ce même âge de repousse, la saison joue un rôle important sur les valeurs azotées : pour les PDIN, l'automne et l'hiver (avril à septembre) se démarquent, alors que pour les PDIE, seule la période hivernale est plus favorable. Si l'on ne prend en compte que les valeurs d'hiver et de printemps (juin à novembre), avant que le stade début d'épiaison ne soit atteint, les valeurs azotées varient selon l'âge : PDIN = 125 à 85 g kg⁻¹ MS et PDIE = 115 à 95 g kg⁻¹ MS, pour 21 et 56 jours de repousse, respectivement.

Tableau B4 : Valeurs alimentaires, selon la saison, de *Lolium perenne* récolté entre 21 et 42 jours de repousse à la Plaine des Cafres (1600 m), d'après les données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989

saisons	décembre à mars	avril mai	juin à septembre	octobre novembre	signif. F
UFL (kg ⁻¹ MS)	0.96	0.95	0.93	0.93	ns
UFV (kg ⁻¹ MS)	0.88	0.88	0.87	0.89	ns
PDIN (g kg ⁻¹ MS)	97 ^a	110 ^b	120 ^b	96 ^a	***
PDIE (g kg ⁻¹ MS)	100 ^a	102 ^a	114 ^b	99 ^a	**

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001
les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05

Le ray-grass d'Italie ou RGI (*Lolium multiflorum*)

Caractéristiques générales

Cette graminée possède un enracinement superficiel peu dense, tient mal le sol et pose problème en sols peu portants. Elle s'établit très facilement mais est très exigeante en eau et résiste mal à la sécheresse (A.C.T.A., 1987). Elle est sensible au froid, mais sa pousse en conditions d'hiver doux peut être importante (cas de La Réunion). Son installation est très facile. Comme toutes les graminées tempérées, le RGI nécessite un lit de semences suffisamment fin et surtout bien rappuyé (Paillat, 1986 ; Paillat *et al.*, 1988). Sa pérennité est très faible : 6 à 18 mois pour les types alternatifs, 18 mois à 3 ans pour les types non-alternatifs, en conditions métropolitaines (A.C.T.A., 1987). A La Réunion, en bonnes conditions d'alimentation hydrique, des RGI ont été productifs pendant plus de 5 ans. Les animaux consomment très bien le ray-grass d'Italie lorsqu'il est au stade feuillu. Cependant, ses tiges durcissent rapidement, sa valeur alimentaire devient alors rapidement médiocre. De plus, il remonte en épis à chaque exploitation. C'est également une plante très sensible à la rouille, sa production chute et elle est alors très mal acceptée par les animaux (A.C.T.A., 1987).

Analyses chimiques

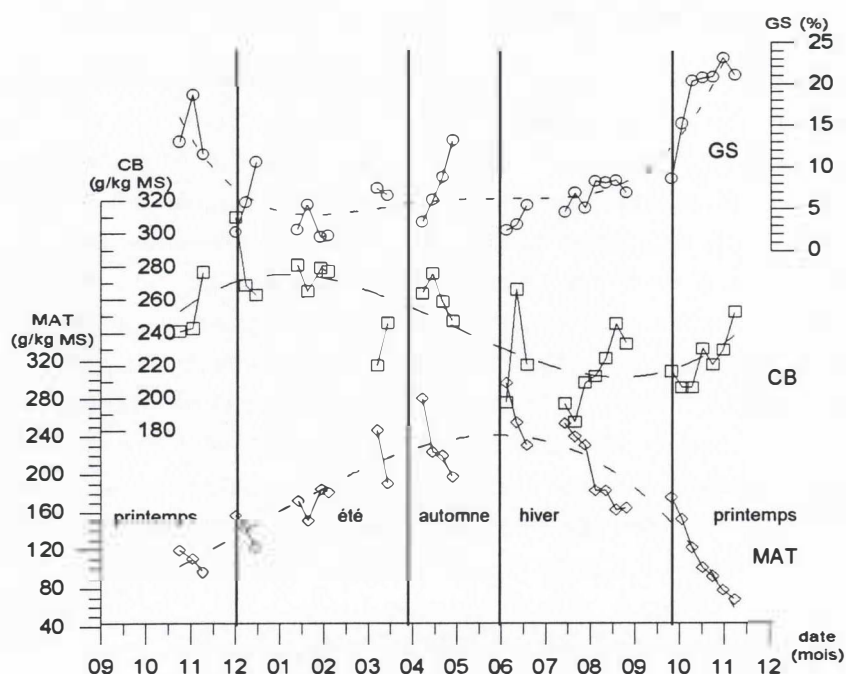


Figure B3 : Evolution, selon la saison, des teneurs en matières azotées totales (MAT), en cellulose brute (CB) et en glucides solubles (GS), de *Lolium multiflorum*, à la Plaine des Cafres (1600 m), d'après les données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989 (les motifs reliés par des traits pleins correspondent aux semaines de repousse, à partir de la 3^{ème} semaine)

Tableau B5 : Composition chimique, selon la saison, de *Lolium multiflorum* récolté entre 21 et 42 jours de repousse à la Plaine des Cafres (1600 m), d'après les données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989

saisons	décembre à mars	avril mai	juin à septembre	octobre novembre	signif. F
MS (%)	12.4	11.2	12.0	15.0	ns
MAT (g kg ⁻¹ MS)	172 ^b	230 ^c	223 ^c	124 ^a	*
CB (g kg ⁻¹ MS)	268 ^b	261 ^b	216 ^a	221 ^a	*
MM (g kg ⁻¹ MS)	114 ^{bc}	79 ^a	125 ^c	102 ^b	*

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001
les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil $p < 0.05$

Teneur en MS (exprimée en %)

La teneur en MS est beaucoup plus faible que celle des autres espèces étudiées. Elle est aussi inférieure à celle rapportée par Demarquilly *et al.* (1980) : MS = 16 %. Bien que l'effet saison ne soit pas significatif, il semble qu'au printemps, elle soit un peu plus élevée. Néanmoins, un ressuyage important du RGI s'avère nécessaire pour l'ensilage.

Teneur en matières azotées totales (MAT exprimée en g kg⁻¹ MS)

La teneur en MAT est significativement plus élevée d'avril à septembre, elle chute rapidement au printemps pour un stade jeune : âge de repousse compris entre 21 et 42 jours (tableau B5). A un stade de repousse de 40 jours, ces valeurs sont comparables à celles données par Demarquilly *et al.* (1980). Si la teneur en MAT semble peu diminuée en été (MAT = 200 à 180 g kg⁻¹ MS pour 21 et 42 jours de repousse, respectivement), la baisse est beaucoup plus nette de juin à novembre : MAT = 260 à 70 g kg⁻¹ MS pour 14 et 63 jours de repousse, respectivement (figure B3). Gilibert (1983) donne, quant à lui, des valeurs très élevées : MAT = 160 à 133 g kg⁻¹ MS malgré un âge de repousse tardif (respectivement 107 et 137 jours) et un stade avancé (épiaison). Selon les résultats obtenus par Isselstein (1993) avec du ray-grass d'Italie, les teneurs en MAT élevées constatées pourraient être en relation avec le faible ensoleillement, notamment à certaines périodes de l'année. Ce manque d'ensoleillement, sujet traité au chapitre suivant, aurait également une influence sur les teneurs en cellulose brute (plus élevée), en MS (plus faible), en glucides solubles (beaucoup plus faible).

Teneur en cellulose brute (CB exprimée en g kg⁻¹ MS)

Comme pour les autres graminées tempérées, les teneurs d'été et d'automne sont significativement plus élevées pour un âge de repousse compris entre 21 et 42 jours (tableau B5). Les variations avec l'âge sont assez fortes de juin à novembre : CB = 195 à 255 g kg⁻¹ MS pour 14 et 63 jours de repousse, respectivement (figure B3), ce qui s'avère comparable aux données de métropole (Demarquilly *et al.*, 1980). Par contre, on n'observe pas de variations selon l'âge en été, les valeurs restent toujours élevées : CB = 260 à 270 g kg⁻¹ MS.

Teneur en matières minérales (MM exprimée en g kg⁻¹ MS)

Cette teneur est plus faible en automne (tableau B5). Aux autres périodes, elle est comparable aux données métropolitaines (Demarquilly et al., 1980).

Valeurs alimentaires

L'analyse des données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989 à la Plaine des Cafres (1600 m), montre que les valeurs énergétiques ne sont pas significativement différentes selon la saison, bien qu'on observe une valeur légèrement inférieure en été (tableau B6). Entre 21 et 42 jours, l'âge de repousse ne discrimine pas significativement les UF. Cependant, en hiver, les valeurs fourragères décroissent avec l'âge : UFL = 0.96 à 0.85 et UFV = 0.90 à 0.81 pour 21 et 63 jours de repousse, respectivement, le début épiaison ayant eu lieu vers 60 jours en hiver et 40 jours en été. Les valeurs rapportées par Gilibert (1983) sont très inférieures : UFL = 0.76 à 0.60 et UFV = 0.70 à 0.49, mais à un âge repousse très tardif (respectivement 107 et 137 jours), le RGI ayant atteint l'épiaison, et pour des conditions de production très difficiles ayant occasionné une pousse très lente.

Comme pour le ray-grass anglais, les valeurs azotées sont variables selon la saison (tableau B6), avec des valeurs plus élevées en automne et hiver pour un stade précoce (21 à 42 jours de repousse). En hiver et printemps (juin à novembre), ces valeurs diminuent avec l'âge de repousse : PDIN = 160 à 50 g kg⁻¹ MS et PDIE = 135 à 70 g kg⁻¹ MS pour 21 et 63 jours de repousse, respectivement. En été, les valeurs azotées ne semblent pas varier avec l'âge repousse.

Tableau B6 : Valeurs alimentaires, selon la saison, de *Lolium multiflorum* récolté entre 21 et 42 jours de repousse à la Plaine des Cafres (1600 m), d'après les données recueillies par Brunschwig en 1988 et 1989

saisons	décembre à mars	avril mai	juin à septembre	octobre novembre	signif. F
UFL (kg ⁻¹ MS)	0.84	0.92	0.91	0.90	ns
UFV (kg ⁻¹ MS)	0.77	0.85	0.87	0.84	ns
PDIN (g kg ⁻¹ MS)	100 ^a	134 ^b	139 ^b	78 ^a	**
PDIE (g kg ⁻¹ MS)	97 ^a	110 ^b	124 ^c	91 ^a	**

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001
les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05

Le ray-grass hybride ou RGH (*Lolium perenne* x *Lolium multiflorum*, ou *Lolium hybridum*)

Caractéristiques générales

Actuellement, la plupart des variétés se rapprochent plus du RGI, mais remontent moins à épis (A.C.T.A., 1987). Ses caractéristiques d'installation et d'exploitation sont celles décrites pour les ray-grass. Sa pérennité est intermédiaire : 3 à 4 ans, quelquefois davantage à La Réunion.

Composition chimique

Les quelques valeurs de MAT obtenues pour du RGH jeune (âge inférieur à 30 jours) récolté en avril 1988 dans les Hauts de l'Ouest (données collectées par Brunschwig), sont de l'ordre de 200 g kg⁻¹ MS. A ce même stade, la teneur en cellulose brute est de 250 g kg⁻¹ MS et la teneur en matières minérales de 100 g kg⁻¹ MS.

Valeurs alimentaires

Lors de ce même essai, les valeurs alimentaires déterminées étaient élevées : UFL = 0.94, UFV = 0.89, PDIN = 126 g kg⁻¹ MS, PDIN = 111 g kg⁻¹ MS, correspondant à un fourrage très jeune.

La fétuque élevée (*Festuca arundinacea*)

Caractéristiques générales

La fétuque élevée est une graminée perenne qui résiste à la submersion, à la sécheresse, au froid et aux fortes chaleurs, au piétinement, à l'acidité : c'est une plante très rustique (Gilibert, 1981). La fétuque élevée résiste bien à la rouille (A.C.T.A., 1987). Son implantation est lente et difficile, il faut un sol très bien préparé et fertilisé, mais sa pérennité est très bonne (G.N.I.S., 1987). Compte tenu de la dureté de son feuillage, il est nécessaire de l'exploiter à un stade très précoce ; elle est alors bien acceptée par les animaux.

A 1200 m dans les Hauts du Sud, Gilibert (1981) trouve un rendement annuel sur terrain dégradé de 12.8 t MS ha⁻¹ (4 coupes) pour un âge de repousse moyen de 92 jours. Sur 2 ans, Bigot *et al.* (1991) trouve un rendement moyen annuel de 14.7 t MS ha⁻¹ avec 9 à 10 exploitations par an, ce qui correspond à un rythme de pâturage de 38 jours en moyenne, pour une altitude élevée et en région sèche (Hauts de l'Ouest à 1300 m). Dans ces conditions, la baisse de production hivernale est de 38 % comparable à celle du kikuyu, inférieure à celle du dactyle, mais supérieure à celle des ray-grass.

Analyses chimiques

La teneur en MS moyenne sur l'année était de 19 % (15 à 24) pour Gilibert (1981). Pour un stade précoce, Bigot *et al.* (1991) trouve 13.2 % en été et 17.3 % en hiver.

Bigot *et al.* (1991) trouve une teneur élevée en MAT : 215 g kg⁻¹ MS pour un stade précoce. Gilibert (1981) trouve, quant à lui, une teneur en MAT de 150 g kg⁻¹ MS pour 92 jours de repousse en moyenne. Ces teneurs décroissent rapidement avec le stade : MAT = 198 à 108 g kg⁻¹ MS au stade feuillu et début floraison, respectivement (Gilibert, 1983). Ces valeurs semblent supérieures à celles obtenues en métropole (Demarquilly *et al.*, 1980).

D'après Gilibert (1981), CB = 300 à 360 g kg⁻¹ MS pour 63 et 112 jours de repousse, aux stades feuillu et floraison, respectivement. Ces valeurs sont supérieures aux données I.N.R.A. (Demarquilly *et al.*, 1980) : CB = 260 à 320 g kg⁻¹ MS pour ces mêmes stades.

Les teneurs en matières minérales sont faibles : MM = 91 à 80 g kg⁻¹ MS pour les stades feuillu et floraison, respectivement. L'I.N.R.A. (Demarquilly *et al.*, 1980) donne des valeurs de 139 à 121 g kg⁻¹ MS. Comme pour l'ensemble des fourrages de La Réunion, Gilibert (1983) observe effectivement une carence en calcium et en phosphore.

Valeurs alimentaires

Gilibert (1983) donne les valeurs énergétiques et azotées suivantes : UFL = 0.84 à 0.63 et UFV = 0.78 à 0.54, PDIN = 135 à 72 g kg⁻¹ MS et PDIE = 123 à 81 g kg⁻¹ MS, aux stades feuillu et début floraison, respectivement. Ces valeurs sont plus élevées que celles données en métropole, notamment pour les PDI.

Le brome cathartique (*Bromus catharticus*)

Caractéristiques générales

Le brome possède un enracinement puissant et des grosses talles, généralement peu nombreuses (A.C.T.A., 1988). Cette espèce est très alternative et très remontante : elle monte en épis à chaque pousse. Son installation est aisée et rapide, à l'image de celle du ray-grass d'Italie. Sa pérennité est équivalente, voire meilleure, que celle du ray-grass hybride : elle peut rester productive plus de 4 ans. En année sèche, son rendement peut même dépasser celui du RGI. Même quand la température est élevée, le brome continue à pousser (G.N.I.S., 1987). Son exploitation se fait principalement en fauche, mais il peut également être pâturé sauf en sols peu portants (A.C.T.A., 1988). Riche en glucides solubles, il est tout à fait adapté à l'ensilage. Le brome est une plante appétente (G.N.I.S., 1989).

Un essai, conduit par l'I.R.A.T., avec deux niveaux de fertilisation, a montré que même avec une fertilisation forte, le brome était peu adapté à la zone des Hauts de l'Ouest, à une altitude supérieure à 1300 m. Son rendement et sa pérennité étaient très faibles, en comparaison avec la houlque laineuse : fourrage qui pousse spontanément dans les Hauts de l'Ouest (Michellon *et al.*, 1984a). Cependant, à la Plaine des Cafres (site de la S.I.C.A. - Lait à 1500 m), en conditions de sols riches dont l'acidité a été corrigée grâce à des chaulages répétés, il semble donner satisfaction au bout de deux années d'exploitation, avec des rendements voisins de ceux du ray-grass hybride.

Analyses chimiques

La teneur en MAT est assez élevée (200 g kg⁻¹ MS), en comparaison avec les tables I.N.R.A. (Demarquilly *et al.*, 1980). Mesuré en septembre et octobre 1993 à la Plaine des Cafres (1500 m), sa teneur en glucides solubles est élevée (pour La Réunion), à savoir : GS = 76 g kg⁻¹ MS (58 à 109), ce qui est comparable aux ray-grass anglais et hybride.

Valeurs alimentaires

Les valeurs pour du brome 1^{er} cycle, données par l'I.N.R.A. (Demarquilly *et al.*, 1980) sont les suivantes : UFL = 0.98 à 0.75 et UFV = 0.95 à 0.67, PDIN = 120 à 49 g kg⁻¹ MS et PDIE = 116 à 72 g kg⁻¹ MS, pour les stades feuillu et début floraison, respectivement. A La Réunion, très peu d'analyses ont été faites à ce jour. Il semblerait cependant que le brome au stade feuillu présente des valeurs identiques à celles données pour la métropole : UFL = 0.99 et UFV = 0.95, PDIN = 139 g kg⁻¹ MS et PDIE = 111 g kg⁻¹ MS, dMO = 82.4 % (pepsine cellulase, méthode Aufrère *et al.*, 1988).

Le kikuyu (*Pennisetum clandestinum*)

Caractéristiques générales

Cette graminée tropicale d'altitude forme un gazon épais qui couvre complètement le sol. C'est donc une plante anti-érosive très adaptée aux zones de pâturage en pente. Sa longévité est excellente et sa résistance à l'envahissement par des mauvaises herbes également : c'est une plante très agressive. Les prairies constituées de kikuyu peuvent être qualifiées de permanentes. La mise en place est généralement faite par bouturage, en plein, ou dans un sillon (Paillat, 1986 ; Bigot *et al.*, 1991), mais le semis est également possible avec des graines importées d'Australie. Le kikuyu est une herbe bien appréciée par les animaux : peu de refus sont constatés, mêmes avec des stolons très longs (Gilibert, 1981).

Gilibert (1981) donne des rendements fourragers à 1200 m d'altitude dans les Hauts du Sud de 16 à 18 t MS ha⁻¹ pour un rythme d'exploitation de 75 à 80 jours. Michellon *et al.* (1982, 1984b, 1985b) note une réponse significative à la fertilisation azotée du kikuyu, cultivé à 1300 m dans les Hauts de l'Ouest (I.R.A.T. Petite France) : 5.9 - 10.7 - 13.3 t MS ha⁻¹ selon les fertilisations : 0 - 30 - 60 unités d'azote par hectare et par coupe, respectivement. L'effet chaulage n'est significatif que pour la fertilisation minimale (30 N) : 9.3 - 12.1 t MS ha⁻¹ sans ou avec chaulage, respectivement. Pichot *et al.* (1982b) note les mêmes réponses à la fertilisation azotée du kikuyu cultivé à 1000 m dans les Hauts du Sud (ferme S.E.D.A.EL.) : 9 - 11.4 - 12.5 t MS ha⁻¹ selon les fertilisations : 0 - 30 - 60 unités d'azote par hectare et par coupe, respectivement. L'effet chaulage n'est également perceptible que pour les faibles fertilisation.

Dans cette même étude, Michellon *et al.* (1984b, 1985b) fait remarquer l'irrégularité de production du kikuyu au cours de l'année : la différence entre production hivernale et estivale s'accroît avec l'altitude, elle peut atteindre la proportion de 1 à 5 pour une altitude supérieure à 1500 m. A plus faible altitude dans la région Sud bénéficiant d'un régime hydrique plus favorable (S.E.D.A.EL., 1000 m), cette différence pourrait être fortement atténuée en n'apportant la fertilisation azotée qu'en hiver (Pichot *et al.*, 1982b). Bigot (1991) a établi les courbes de rendement du kikuyu (ferme S.E.D.A.EL., altitude 1000 m) en fonction de l'âge de la repousse et de la saison. Le kikuyu croît de façon exponentielle jusqu'à 70 jours de repousse au moins ; à ce stade, il atteint 65 cm en été mais seulement 20 cm en hiver, avec respectivement, un rendement supérieur à 4 t MS ha⁻¹ et 2.5 t MS ha⁻¹ pour une coupe.

Analyses chimiques et biochimiques

Teneur en MS (exprimée en %)

Selon les données obtenues par Bigot (1991), la teneur en MS (inférieure à 17 %) ne varie pas en fonction de l'âge repousse en été (3 à 10 semaines). Par contre, elle croît légèrement en hiver (de 18 % à 20 %). L'essai conduit par Pichot (1982), sur 8 coupes dans l'année (âge de repousse allant de 35 jours en été à 75 jours en hiver), montre une décroissance de la teneur en MS de novembre (17 %) à mai (12 %), puis une croissance jusqu'en novembre (19 %) et à nouveau une décroissance jusqu'en janvier (14 %). Cette évolution de la teneur en MS doit vraisemblablement différer selon l'année et le site en fonction du régime des pluies.

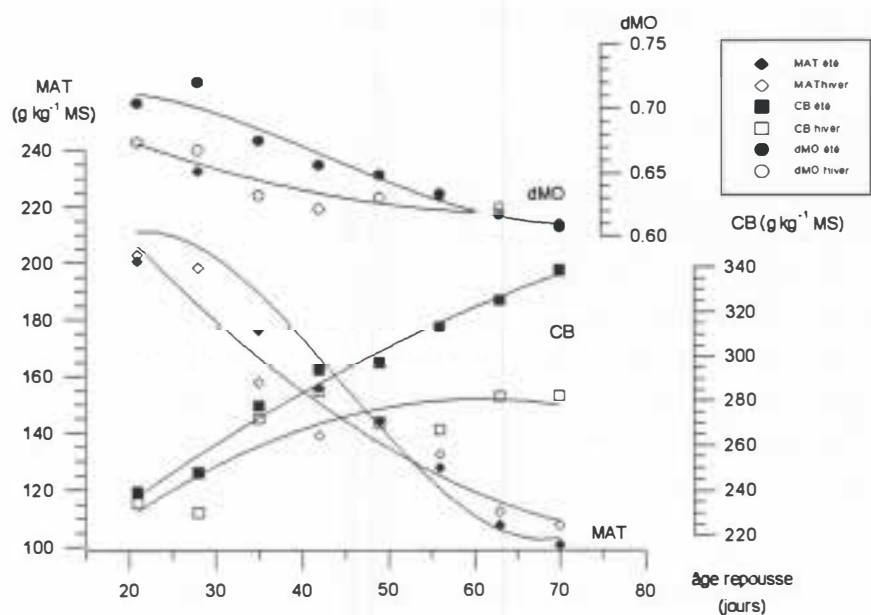


Figure B4 : Evolution des teneurs en matières azotées totales (MAT), en cellulose brute (CB) et de la digestibilité de la matière organique (dMO) par la méthode C.I.R.A.D. - E.M.V.T., de *Pennisetum clandestinum*, en fonction de l'âge de repousse et de la saison, d'après les données obtenues par Bigot en 1989

Teneur en matières azotées totales (MAT exprimée en g kg⁻¹ MS)

Gilibert (1983) trouve des teneurs allant de 178 à 111 g kg⁻¹ MS pour 35 et 140 jours de repousse, respectivement. Cette teneur décroît avec l'âge de repousse, plus fortement en été qu'en hiver (figure B4). D'après les données de Pichot *et al.* (1982b) le minimum se situe en janvier (MAT = 160 g kg⁻¹ MS) et le maximum vers juillet (MAT = 230 g kg⁻¹ MS) pour 35 et 75 jours de repousse, respectivement. La teneur en MAT s'accroît avec la fertilisation :

MAT = 154 à 172 g kg⁻¹ MS avec, respectivement, N=0 et N=60 (Michellon *et al.*, 1982),
MAT = 177 à 206 g kg⁻¹ MS avec, respectivement, N=0 et N=60 (Pichot *et al.*, 1982b).

La teneur en MAT est en réalité très variable si l'on se réfère aux résultats des essais conduits par divers chercheurs (Bigot, Gilibert, Mandret, Michellon, Pichot). Dugmore (1988) donne une valeur moyenne de MAT = 187 g kg⁻¹ MS (127 à 233) pour un âge de repousse de 20 à 30 jours. Les valeurs de la Réunion (Bigot, 1991) semblent un peu plus élevées pour un stade de repousse comparable : MAT = 209 g kg⁻¹ MS (198 à 233).

Teneur en cellulose brute (CB exprimée en g kg⁻¹ MS)

La teneur en cellulose brute croît très nettement avec l'âge du kikuyu (figure B4). Elle est toujours plus élevée en été : CB = 240 à 330 g kg⁻¹ MS pour, respectivement, 20 et 70 jours de repousse (Bigot, 1991). Gilibert (1981) trouve des teneurs un peu plus faibles en saison intermédiaire : CB = 264 et 298 g kg⁻¹ MS à 40 et 100 jours, respectivement. En hiver, cette teneur plafonne à 280 g kg⁻¹ MS à partir de 60 jours de repousse (Bigot, 1991). Pour l'Afrique du Sud en saison estivale (novembre à mai), Dugmore (1988) donne CB = 244 g kg⁻¹ MS (211 à 303) avec un âge de repousse de 20 à 30 jours. Les valeurs de La Réunion (Bigot, 1991) semblent comparables pour le même stade : CB = 238 g kg⁻¹ MS (230 à 248).

Teneur en matières minérales (MM exprimée en g kg⁻¹ MS)

Cette teneur varie peu selon l'âge de repousse (Bigot, 1991) : MM = 100 g kg⁻¹ MS (96 à 109) en été et MM = 90 g kg⁻¹ MS (83 à 107) en hiver. Elle semble comparable à celle des fourrages tempérés.

Digestibilité de la matière organique (dMO exprimée en %)

La diminution de digestibilité avec l'âge est forte en été (figure B4) : baisse de 10 points en 50 jours. Elle est plus modérée en hiver : baisse de 5 points en 50 jours. Cependant, dans les essais de Bigot en 1989, la digestibilité (méthode C.I.R.A.D. - E.M.V.T.) est plus élevée en été qu'en hiver, à âge de repousse égal. Gilibert (1981) donne des digestibilités (différentes équations) un peu supérieures : 76 % à 40 jours et 59 % à 100 jours.

Valeurs alimentaires

Le calcul des valeurs alimentaires est étroitement lié à la digestibilité du fourrage. Le kikuyu jeune présente une bonne valeur alimentaire proche de 0.80 UFL à 35 jours de repousse (Gilibert, 1983 ; Bigot, 1991), mais cette valeur décroît très rapidement, notamment en été (figure B5). Cette baisse est ensuite plus lente jusqu'à 0.60 UFL environ pour un âge de repousse supérieur à 100 jours (Gilibert, 1981). Les données présentées par Bigot (1991) tendent à montrer que la valeur alimentaire du kikuyu varie peu en hiver (de 0.77 à 0.70 UFL) et reste à un niveau assez élevé : 0.70 UFL. La décroissance des valeurs azotées est plus importante, notamment en ce qui concerne les PDIN, sans effet marqué de la saison.

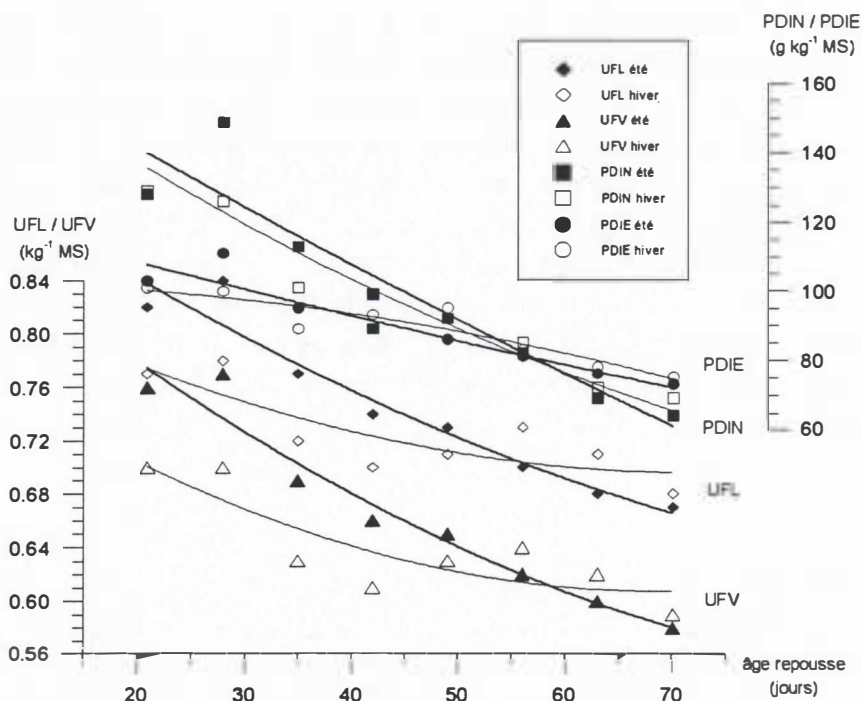


Figure B5 : Evolution des valeurs alimentaires de *Pennisetum clandestinum* : unités fourragères (UFL et UFV), protéines digestibles intestinales (PDIN et PDIE), en fonction de l'âge de la repousse et de la saison, d'après les données obtenues par Bigot en 1989

Le chloris (*Chloris gayana*)

Caractéristiques générales

Cette graminée tropicale s'implante par semis et la couverture du sol est rapide grâce aux stolons qui donnent naissance à de nouvelles touffes ; sa pérennité dépasse 10 ans. Elle est surtout exploitée en fauche. Sa qualité est bonne lorsqu'elle est jeune, elle a tendance ensuite à grainer avec corrélativement une baisse importante de qualité (Gilibert, 1981). En zone littorale au vent, Maheu *et al.* (1985) donne un rendement annuel supérieur à 30 t MS ha⁻¹ pour une récolte à 26.6 % de MS en moyenne. En altitude, dans la zone au vent (600 m), le rendement varie de 15 à 20 t MS ha⁻¹ (Pichot *et al.*, 1982a ; Gilibert, 1981) avec une baisse de production de 40 % en hiver. Conduit sous irrigation, dans la zone littorale sous le vent, sa production pourrait atteindre 40 t MS ha⁻¹ (Bigot, 1985) avec une fertilisation importante et 8 à 10 coupes par année. Chez les producteurs de foin de cette zone, les rendements annuels observés sont plus modestes (25 t MS ha⁻¹). Sur des sols sableux et filtrants, ce rendement est de 23.5 et 20.2 t MS ha⁻¹ à Pierrefonds et St Joseph, respectivement (Brunschwig, 1991).

Analyses chimiques et biochimiques

La teneur en MS varie de 18 à 21 % en altitude (600 m, côte au vent) selon le stade (Gilibert, 1983). Elle varie de 20 à 26 % dans les Bas sous le vent (Brunschwig, 1991).

A 600 m, côte au vent, pour un âge moyen de 51 jours, Gilibert (1981) trouve une teneur moyenne en MAT de 114 g kg⁻¹ MS. La teneur en MAT diminue très rapidement avec l'âge de la repousse : en saison froide, MAT = 152 à 98 g kg⁻¹ MS pour les stades feuillu et grenaison, respectivement (Gilibert, 1983). Dans les bas sous le vent, Brunschwig (1991) trouve MAT = 113 et 90 g kg⁻¹ MS pour 35 et 51 jours, respectivement, et d'après les données de Mandret (1993), MAT = 145 à 70 g kg⁻¹ MS pour un âge de repousse de 10 et 50 jours, respectivement. En altitude, les teneurs en cellulose brute varient peu : CB = 310 à 350 g kg⁻¹ MS pour les stades feuillu et floraison, respectivement (Gilibert, 1981). Brunschwig (1991) donne des teneurs plus élevées dans les Bas : CB = 350 à 375 g kg⁻¹ MS pour des stades comparables. Les teneurs en matières minérales varient de 105 à 86 g kg⁻¹ MS selon l'âge, sans différences importantes entre sites (Gilibert, 1983 ; Brunschwig, 1991). La digestibilité de la matière organique est plutôt faible : dMO = 58 à 55 % (méthode C.I.R.A.D. - E.M.V.T.) pour 35 et 51 jours de repousse, respectivement (Brunschwig, 1991).

Valeurs alimentaires

L'exploitation du chloris doit être faite à un stade assez jeune, faute de quoi sa valeur alimentaire est mauvaise (Gilibert, 1981). Cet auteur (1983) donne les valeurs suivantes : UFL = 0.71 à 0.62 et UFV = 0.63 à 0.53, PDIN = 101 à 64 g kg⁻¹ MS et PDIE = 99 à 73 g kg⁻¹ MS pour les stades feuillu et grenaison, respectivement. La valeur alimentaire du chloris, produit dans les Bas, est plus faible, principalement concernant les valeurs azotées : UFL = 0.63 à 0.58 et UFV = 0.52 à 0.48, PDIN = 72 à 57 g kg⁻¹ MS et PDIE = 73 à 66 g kg⁻¹ MS, pour 35 et 51 jours de repousse, respectivement (Brunschwig, 1991).

Abaques de calcul des quantités de mélasse à apporter

Paillat (1994) propose plusieurs abaques permettant de déterminer la quantité de mélasse à épandre, mais aussi de régler le débit de la cuve à mélasse et l'avancement du tracteur lors des épandages sur andains. Ces abaques seront simplifiés avec les techniciens de développement (tableau synthétique) pour une diffusion auprès des éleveurs.

Les abaques présentés (figures B6, B7 et B8) s'utilisent successivement. L'exemple figuré est celui d'un dactyle récolté en saison chaude avec un rendement fourrager moyen de 4 t MS ha⁻¹ et une teneur moyenne en MS de 30 %. La largeur de fauche est de 2.50 m ; il n'y a pas de regroupement d'andain et on vise une vitesse d'épandage de la mélasse (non diluée) de 4 km h⁻¹.

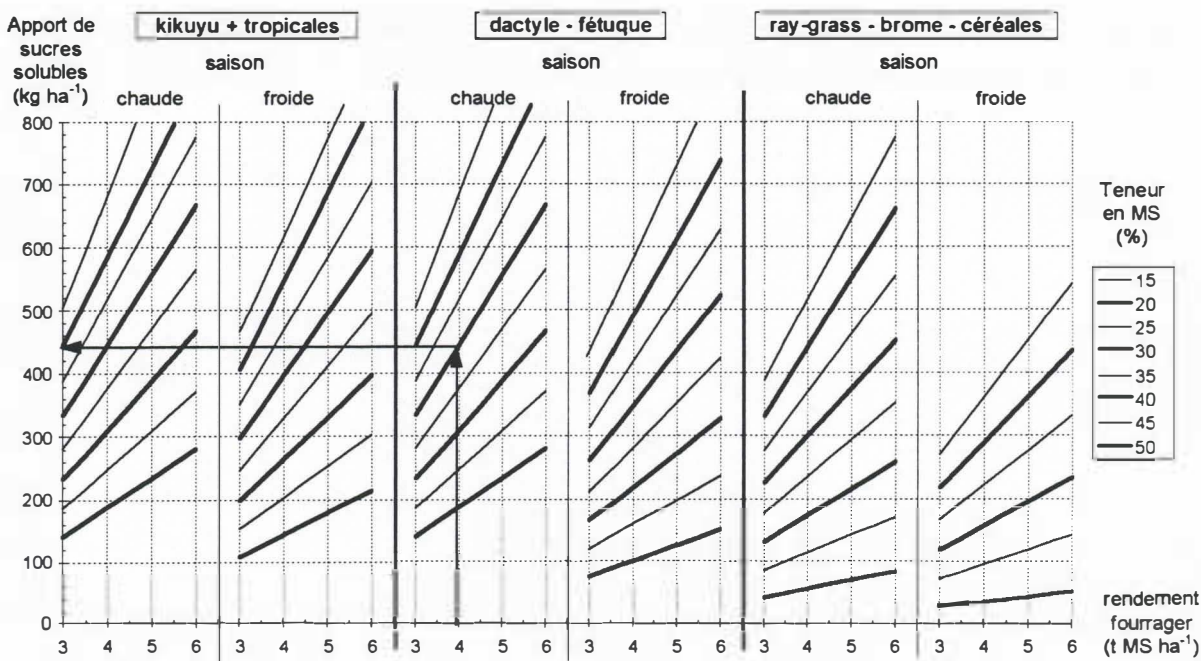


Figure B6 : Calcul des doses de sucres solubles nécessaires selon le fourrage, la saison, le rendement fourrager et la teneur en MS

Pour notre exemple, la dose de sucres solubles nécessaires est de 450 kg ha⁻¹.

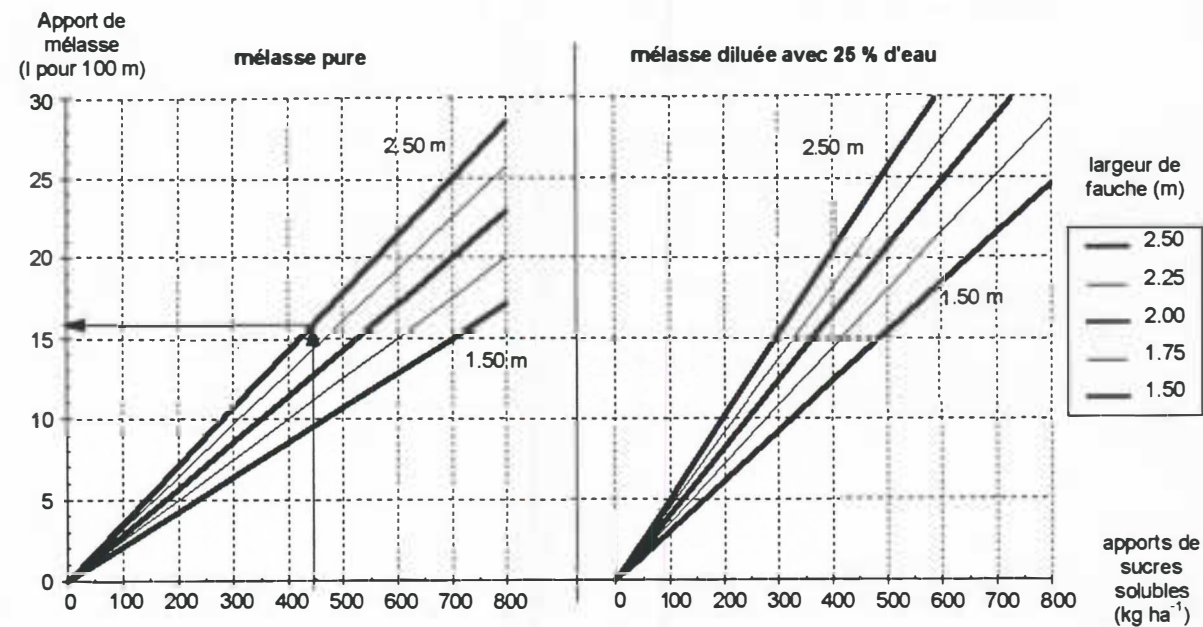


Figure B7 : Calcul de la quantité de mélasse à épandre sur un andain selon l'apport de sucres solubles nécessaires déterminé par l'abaque précédent (figure B6) et la largeur de fauche (multiplier les quantités si regroupement d'andains)

Pour notre exemple, 16 l de mélasse doivent être épandus sur 100 m d'andain.

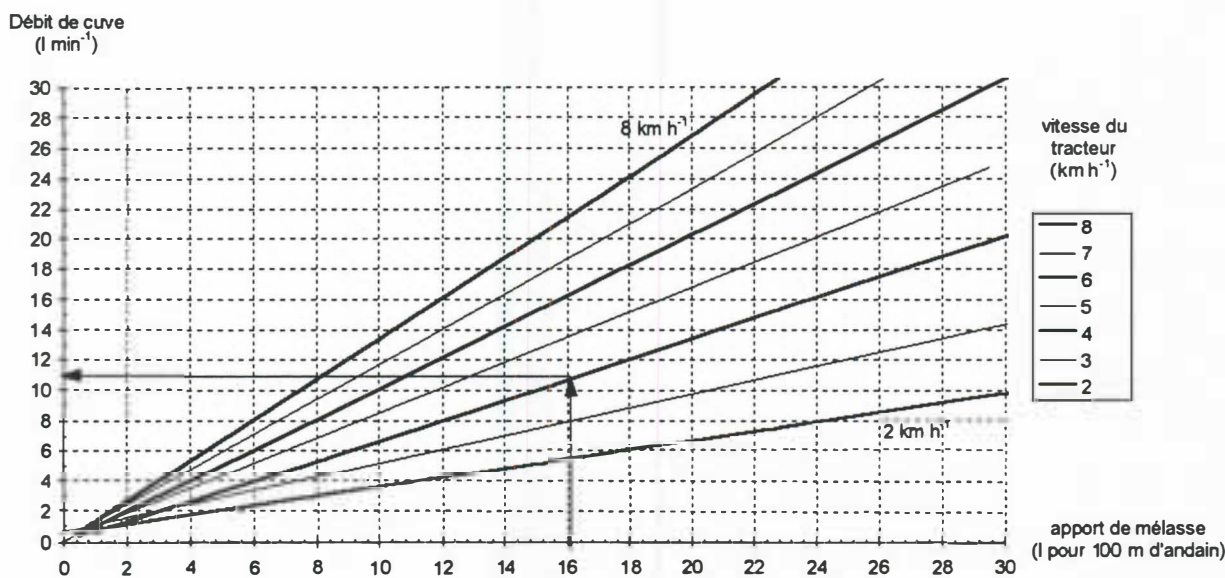


Figure B8 : Détermination du débit de la cuve (dépendant de la viscosité de la mélasse) selon la vitesse d'avancement du tracteur et la quantité de mélasse nécessaire pour 100 m d'andain déterminée par l'abaque précédent (figure B7)

Pour notre exemple, avec une vitesse d'avancement du tracteur de 4 km h⁻¹, le débit d'écoulement de la mélasse doit être de 11 l min⁻¹. Plusieurs mesures avec un récipient et un chronomètre sont alors nécessaires pour ajuster ce débit ou inversement la vitesse d'épandage.

Caractéristiques météorologiques

Pluviométrie

Météo-France a réalisé une étude des séquences de 3 et 4 jours sans pluie (Service de la météorologie nationale, 1987) : pour chaque mois, la fréquence d'observation d'au moins deux périodes de 3 jours (ou de 4 jours) sans pluie a été notée sur les vingt dernières années (1966 - 1985), une note et une appréciation sont données en fonction de cette fréquence (tableau B7). Cette étude était principalement destinée à l'évaluation des possibilités de fenaison dans les Hauts de l'île. C'est pourquoi n'ont été quantifiées que les séquences de 3 ou 4 jours sans pluie. L'objectif de l'ensilage en balles enrubannées étant la récolte d'un fourrage mi-fané (45 à 50 % de MS), nous avons retenu principalement l'analyse des périodes de 3 jours sans pluie.

Tableau B7 : Barème de notation utilisé par les services de la météorologie nationale (1987)

nombre d'années	notes	appréciations
de 0 à 6 années	0	très défavorable
de 7 à 9 années	1	défavorable
de 10 à 12 années	2	juste favorable
de 13 à 15 années	3	favorable
16 années et plus	4	très favorable

Insolation (figure B9)

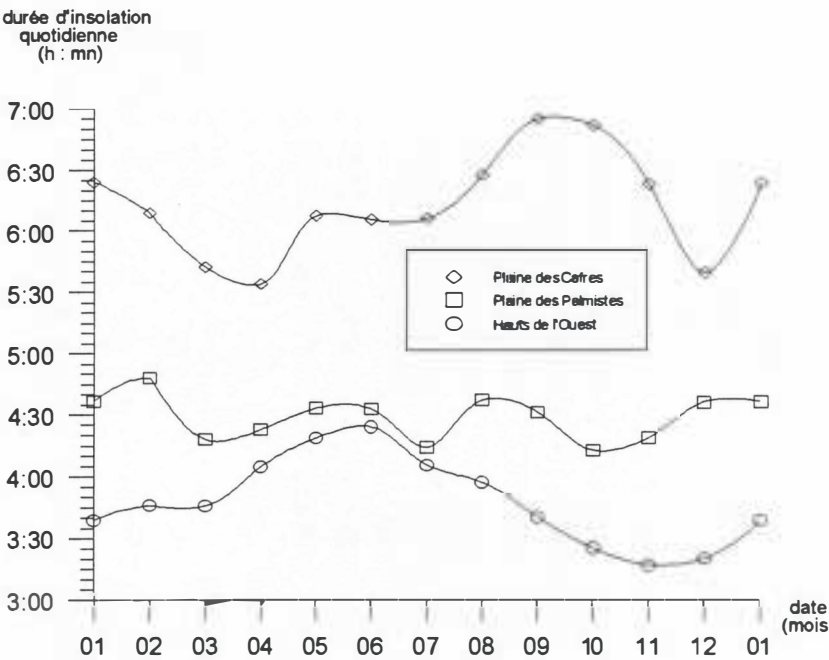


Figure B9 : Durée d'insolation moyenne quotidienne en fonction du mois pour trois régions (période 1966 - 1985)

En cours d'année, le rapport insolation du matin sur insolation de l'après-midi peut varier : 4.4 de novembre à janvier, 1.9 et 2.9 de février à octobre pour la Plaine des Palmistes et les Hauts de l'Ouest, respectivement. Par contre, la différence est moins marquée pour la Plaine des Cafres : 1.2 de mai à octobre (hiver) et 1.6 de novembre à avril (été).

températures (figure B10)

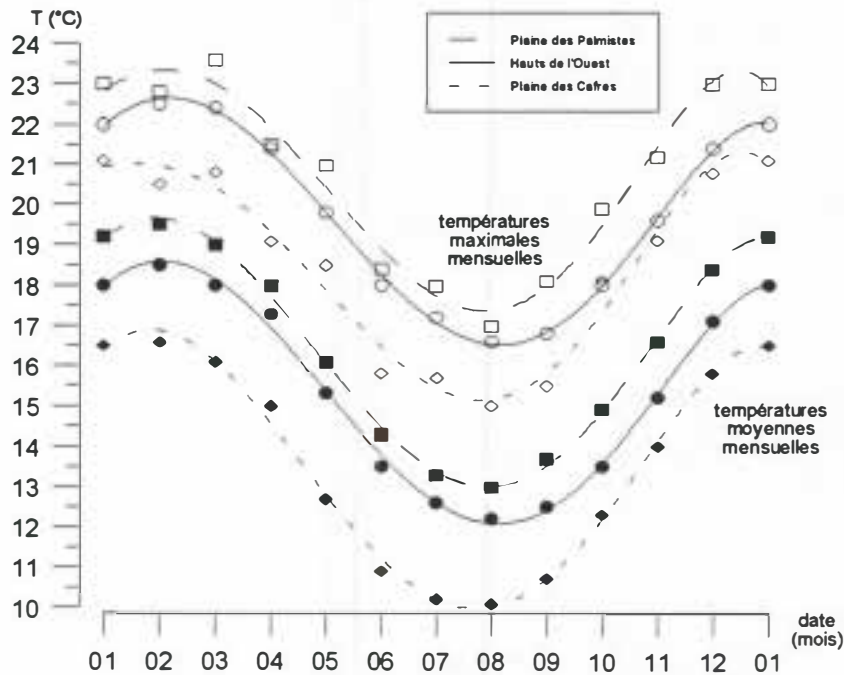


Figure B10 : Températures moyennes et maximales quotidiennes en fonction du mois pour trois régions (période de 20 ans environ)

Vents (figure B11)

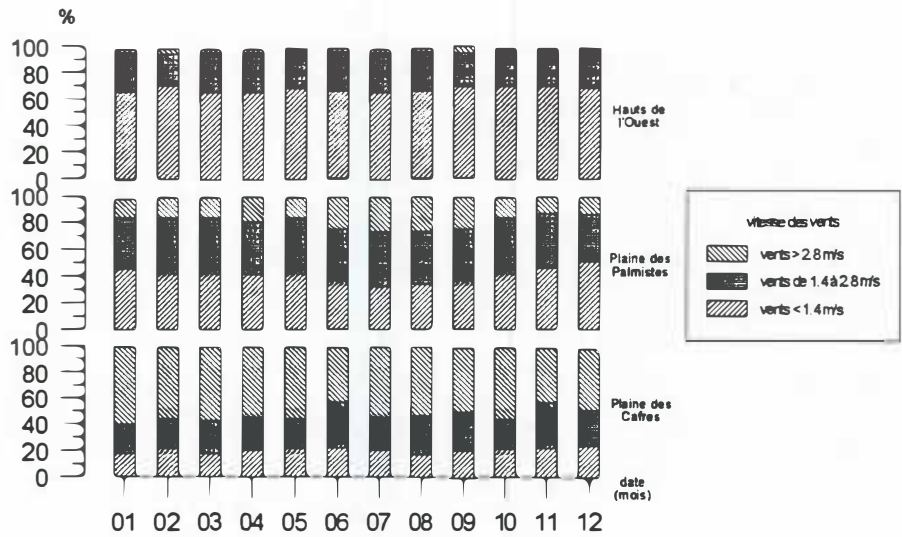


Figure B11 : Répartition des vents moyens quotidiens, selon leur vitesse, en fonction du mois, pour trois régions (période de 1984 à 1991)

Etude de la dessiccation

Analyses multifactorielles (figures B12 et B13)

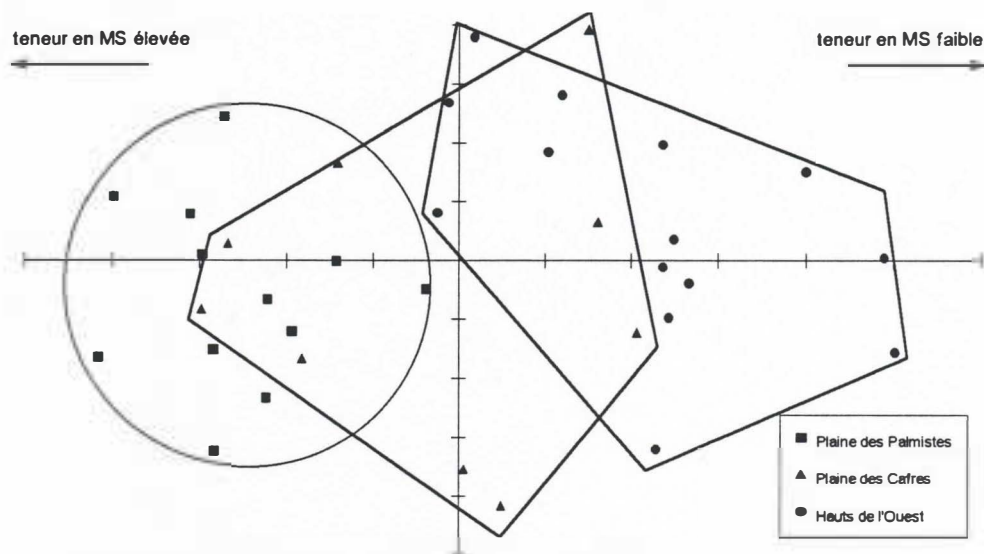


Figure B12 : Analyse factorielle des correspondances multiples représentant les régions en 1990 et 1991 (Dhuin, 1993)

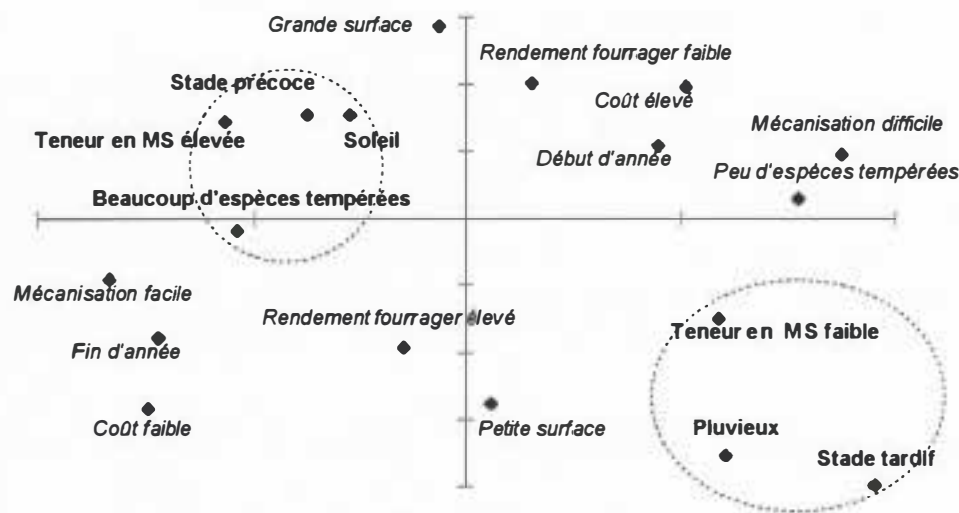


Figure B13 : Analyse factorielle des correspondances multiples représentant deux modalités des conditions de récolte en 1990 et 1991 (Dhuin, 1993)

Exemple de quelques cinétiques de dessiccation

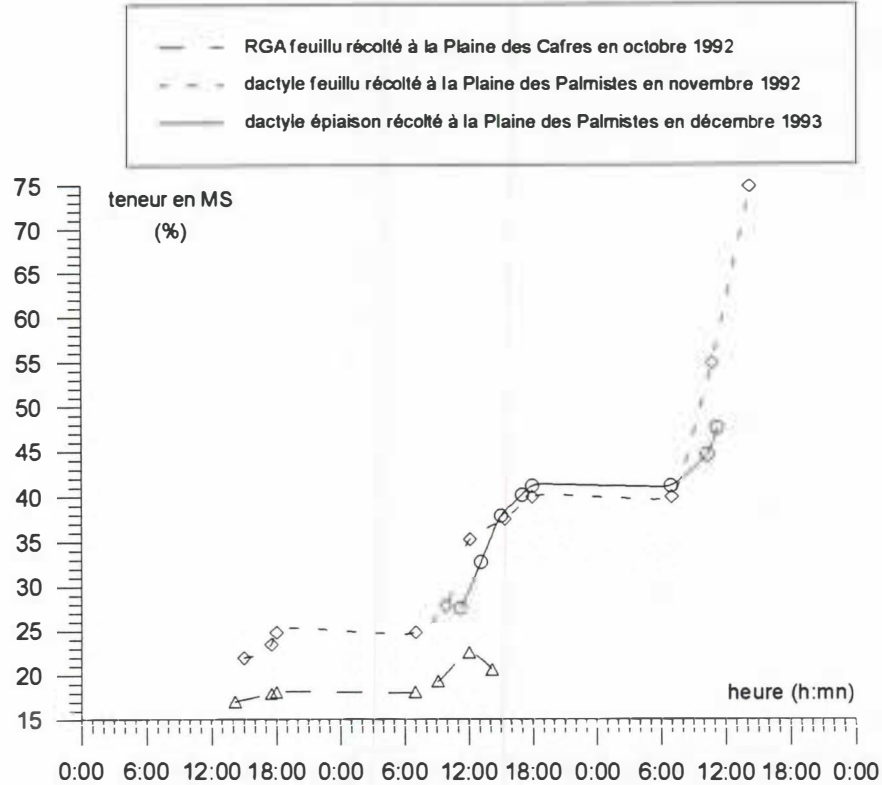


Figure B14 : Cinétiques de dessiccation de *Lolium perenne* et *Dactylis glomerata*, sous conditions météorologiques favorables

Ces cinétiques montrent différents aspects de la dessiccation du fourrage en conditions favorables, c'est à dire sans pluies (figure B14).

Le rendement très élevé (rendement équivalent en andains de 17000 kg MS ha⁻¹) et la teneur en MS à la fauche faible (17 %) du RGA donne des vitesses de dessiccation faibles, malgré des quantités d'eau évaporée très importantes : environ 9300 kg d'eau ha⁻¹ pour atteindre seulement 22.5 % de MS. Il est très difficile, avec un tel fourrage d'atteindre une teneur en MS suffisante pour l'ensilage en balles enrubannées. Par contre, dans l'optique d'un simple ressuyage pour l'ensilage coupe - fine, le séchage durant 24 heures est presque suffisant. En réalité, seul le matin est réellement efficace pour l'évaporation de ces grandes quantités d'eau.

Les cinétiques de dessiccation sur les deux dactyles à la Plaine des Palmistes sont comparables, malgré des stades de récolte très différents. On peut remarquer dans les deux cas, la meilleure efficacité du séchage durant la matinée et en début d'après-midi, avec toutefois une dessiccation qui se poursuit en fin d'après-midi, et une stabilité durant la nuit. Les intensités de dessiccation matinales sont un peu plus élevées en 1992, en raison des meilleures conditions climatiques (déficit de saturation plus élevé) et du stade plus favorable à la dessiccation (feuillu en 1992, épiaison en 1993) (Jones, 1979 ; Casagrande, 1991).

ANNEXE C

**Etanchéité de l'enrubannage et résistance
des films étirables en conditions tropicales**

Capteurs et centrale de mesures

Principe de fonctionnement des débitmètres régulateurs massiques

Sur un tube capillaire, en dérivation d'un élément déprimogène, un pont de Wheatston entre deux bobines résistantes montées de part et d'autre d'un élément chauffant donne la mesure de la différence thermique provoquée par le passage du gaz.

[C1]

$$\Delta T = \frac{P}{m C_p} A$$

ΔT = différence de température (K)

C_p = chaleur spécifique du gaz à pression constante ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

P = puissance de l'élément chauffant (kJ s^{-1})

m = débit massique (kg s^{-1})

A = constante de proportionnalité

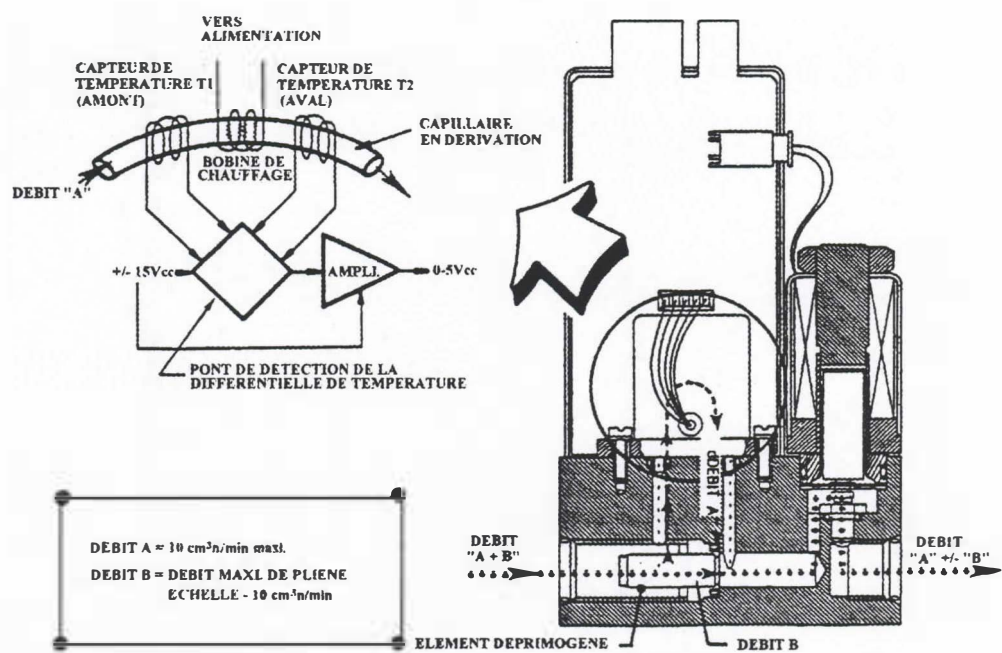


Figure C1 : Principe de fonctionnement des débitmètres - régulateurs massiques (source : document technique Brooks Instrument Rosemount)

Un facteur de correction calculé pour chaque gaz (chaleur spécifique de l'air / chaleur spécifique du gaz utilisé) permet d'utiliser ces débitmètres avec d'autres gaz que celui ayant servi à l'étalonnage. Le débit doit alors être corrigé :
débit réel = indication de sortie x facteur du gaz employé / facteur du gaz d'étalonnage.

Tableau C1 : Facteurs de conversion selon le gaz utilisé (source : document technique Brooks)

gaz	chaleur spécifique ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)	facteur de conversion	densité
air	29.13	1.00	1.000
CO ₂	37.564	0.78	1.518

Contrôle des débitmètres régulateurs massiques

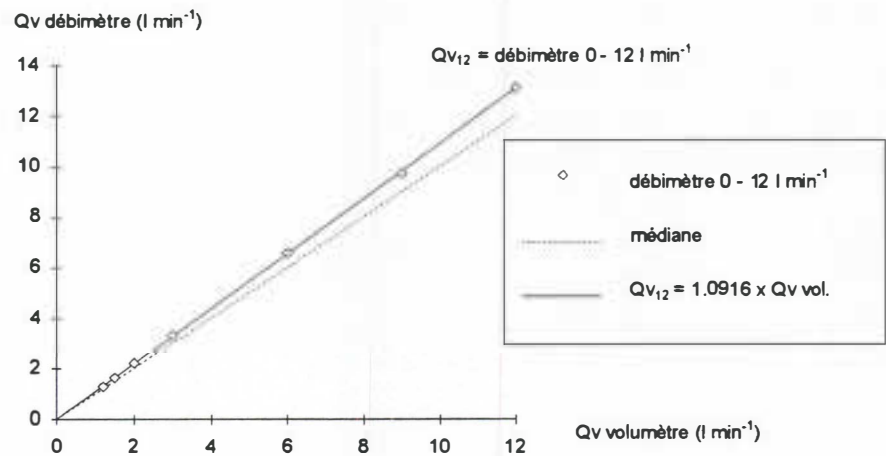


Figure C2 : Etalonnage du débitmètre 0 - 12 l min⁻¹ sur un volumètre Brooks

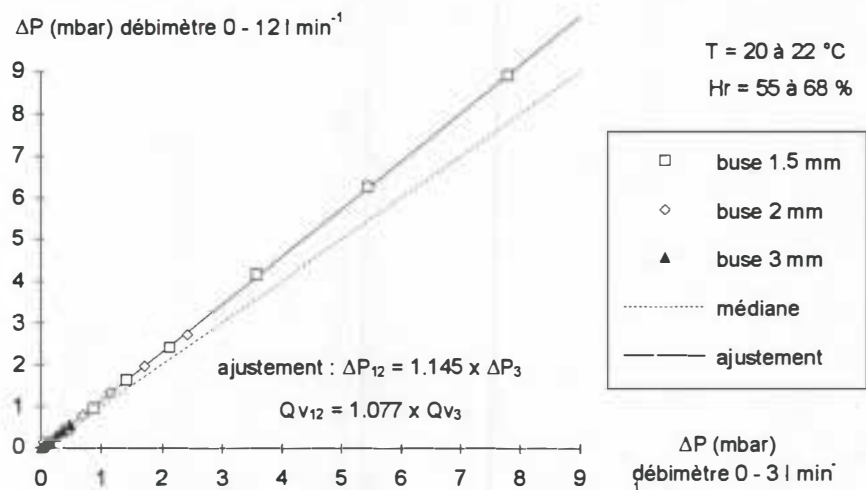


Figure C3 : Comparaison des différences de pressions enregistrées sur fût étanche avec les débitmètres 0 - 12 et 0 - 3 l min⁻¹

Principe de fonctionnement des transmetteurs de pression

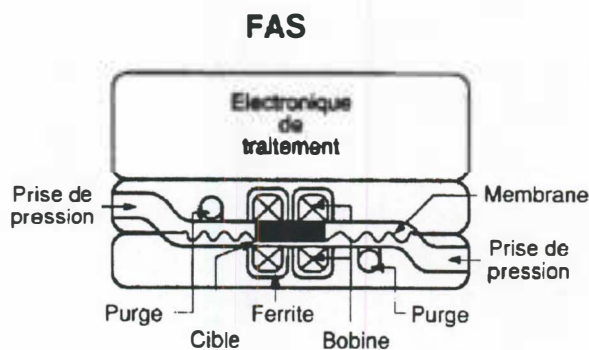


Figure C4 : Coupe schématique du capteur SEDEME FAS (source : document Sedeme)

Mesures sur fût étanche

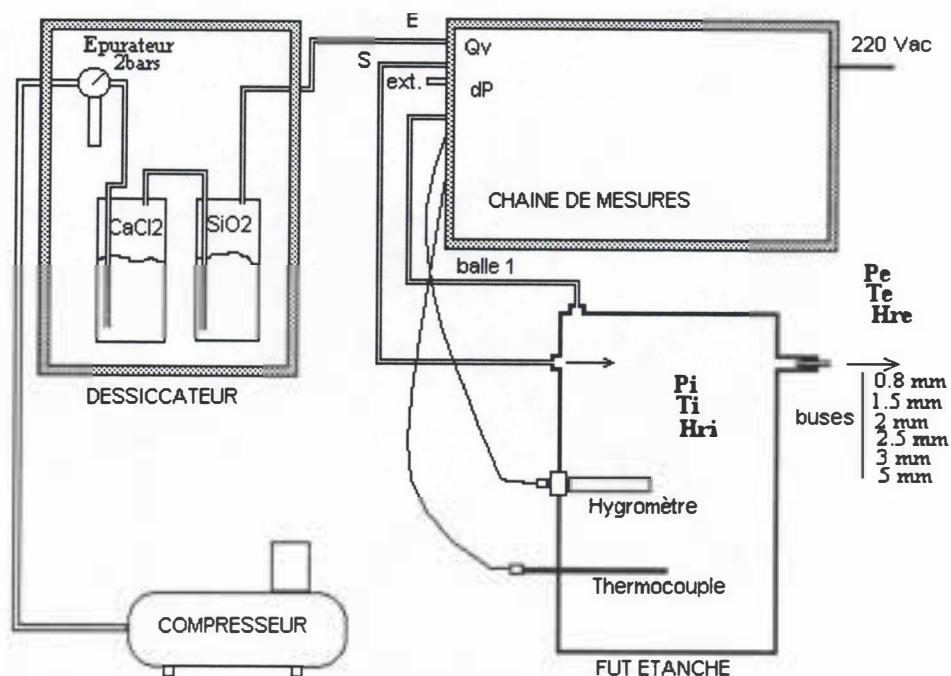


Figure C5 : Dispositif permettant les mesures sur fût étanche

Balles témoins

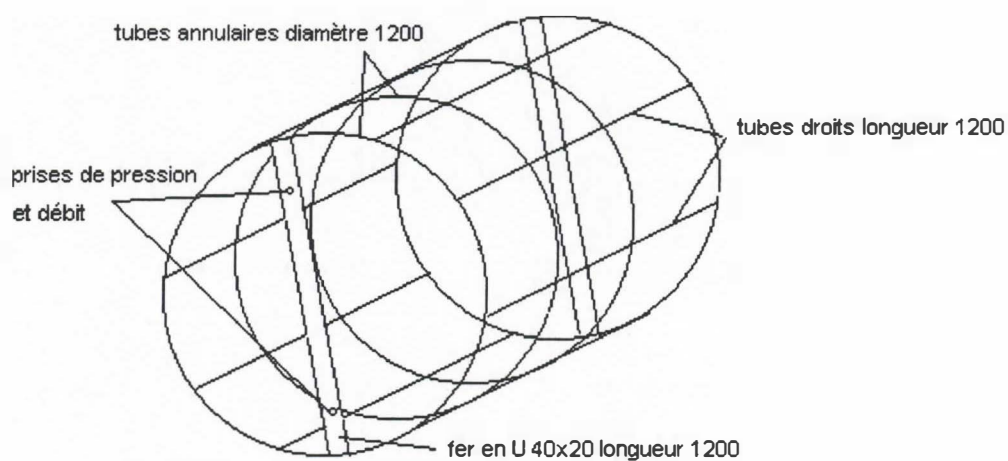


Figure C6 : Schéma de construction des balles témoins simplifiées
(d'après Gaillard et al., 1993)

Exposition des films étirables

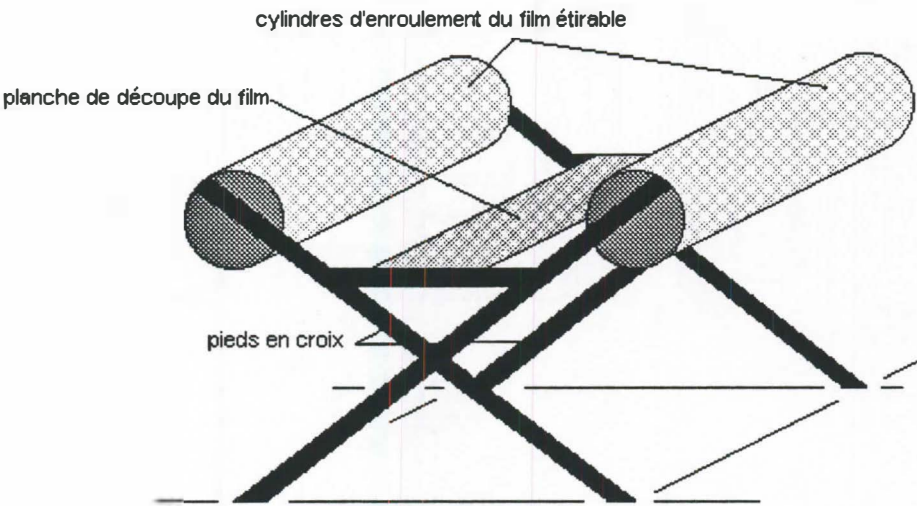


Figure C7 : Dispositif pour étirer les films en plusieurs couches avant l'exposition sur cadres

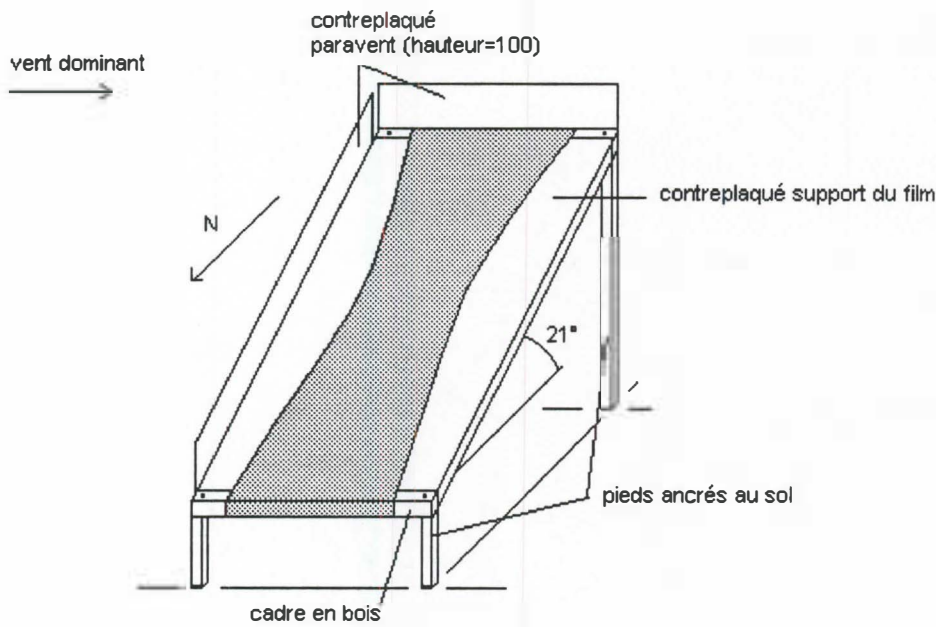


Figure C8 : Cadres en bois recevant les films étirables pour exposition longue durée

Modélisation des échanges gazeux

Equation dimensionnelle

Significations des termes utilisés dans les équations C2 à C17 :

α = constante d'écoulement = 1.4	Q_m = débit massique (kg s^{-1})
d = diamètre de la buse (m)	Q_v = débit volumique ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
ΔP = pression différentielle (Pa)	R = constante des gaz = $8,314 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
H_r = humidité relative (%)	ρ = masse volumique (kg m^{-3})
K = coefficient thermodynamique	ρ_i = masse volumique intérieure (kg m^{-3})
M = masse molaire = $29,13 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$ (air)	S = section de la buse (m^2)
P_o = pression au niveau de la mer (Pa)	T_e = température extérieure ($^\circ\text{K}$)
P_e = pression extérieure (Pa)	T_v = température virtuelle ($^\circ\text{K}$)
P_i = pression intérieure (Pa)	V = vitesse de l'air (m s^{-1})
P_{vs} = pression de vapeur saturante (Pa)	z = altitude (m)

Les facteurs intervenants dans l'équilibre thermodynamique du fût étanche sont : Q_m , Δp , ρ et d . On écrit donc l'équation dimensionnelle suivante (Singainy, 1992) :

[C2] $Q_m = f(\Delta P, \rho, d) = K \Delta P^a \rho^b d^c$, K est une constante déterminée expérimentalement.

Après résolution de cette équation, on a :

[C3] $Q_m = K \Delta P^{1/2} \rho^{1/2} d^2$ or : $Q_m = \rho Q_v$ et $Q_v = S V$ donc :

[C4] $Q_v = K \frac{\Pi d^2}{4} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$

Dans le cas étudié, ρ représente la masse volumique du gaz à l'intérieur du fût, soit ρ_i . Si on admet que l'écoulement est isentropique, on aura dans ces conditions :

[C5] $\rho_i = \frac{M P_e^{(\alpha-1)/\alpha}}{R T_v} P_i^{1/\alpha}$ avec : $P_i = \Delta P + P_e$ Après transformations, on a :

[C6] $\frac{\Delta P}{P_e} = K \frac{16 M}{\Pi^2 d^4 R T_v} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P}{P_e}\right)^{1/\alpha} \cdot Q_v^2$

Détermination du coefficient expérimental K

Calculé à partir de l'équation [C6] et des mesures de différences de pression pour différents débits et diamètres de buse (Singainy, 1992), le coefficient expérimental K prend en compte les inconnues du système (précision des mesures, caractéristiques des buses, type d'écoulement). Les valeurs expérimentales de K peuvent être modélisées par l'équation $K = f(Q_v, d, \Delta P)$. Il n'y a pas de corrélation avec ΔP . Par contre, la régression $K = f(Q_v)$ est intéressante : $r^2 = 0.975$ (figure C9). La régression multiple $K = f(Q_v, d)$ n'apporte pas plus d'information.

La variation de K est donc essentiellement expliquée par le débit volumique Q_v (Singainy, 1992) :

[C7] $K \cong 0.147 \cdot Q_v^{-1/6}$ (Q_v exprimé en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

Remarques

Le coefficient K modélisé ressort d'une étude statistique basée sur des mesures de débit volumique Qv compris entre 0.3 et 13 l min⁻¹. Au-delà, le modèle n'est plus valable. Malgré tout, il semblerait que pour des débits supérieurs à 10 l min⁻¹, les valeurs de K deviennent constantes ; ce qui permet de penser que l'équation est admissible au-delà de 13 l min⁻¹. Pour les faibles débits, la précision du modèle est moins bonne. Le type d'écoulement peut être mis en cause : pour les débits inférieurs à 2 l min⁻¹, d'autres facteurs pourraient intervenir (diamètre et rugosité des buses, différences de pression et de température entre l'intérieur et l'extérieur).

Compte tenu de la liaison forte entre K et le débit (r² = 0.97), on peut émettre l'hypothèse que ce coefficient expérimental intervient pour compenser les erreurs de mesures liées au débitmètre (travail en bas de la gamme de mesures avec le débitmètre 0 - 12 l min⁻¹). Les conditions d'étalonnage en usine de cet appareil sont rigoureusement contrôlées (température, humidité, pression du gaz). Ces conditions ne sont pas forcément bien maîtrisées lors des essais sur fût et à fortiori sur balles enrubannées.

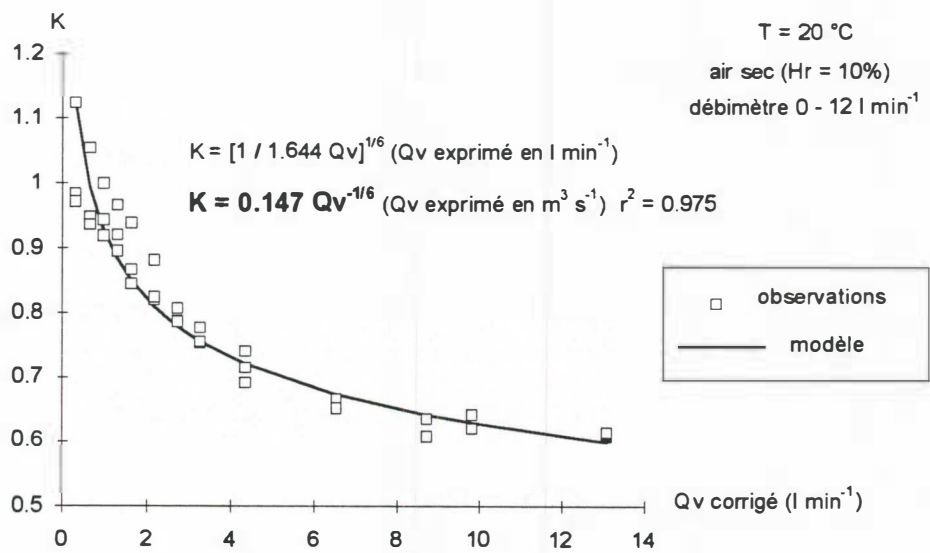


Figure C9 : Modélisation du coefficient expérimental K

Equation finale de la modélisation sur fût étanche

La modélisation sur fût étanche avec buse calibrée a permis de mettre au point la formule suivante (Singainy, 1992) :

[C8]
$$\frac{\Delta P}{P_e} \cong 0.147 \frac{16 M}{\Pi^2 d^4 R T_v} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P}{P_e}\right)^{1/\alpha} \cdot Q_v^{11/6}$$

[C9]
$$\frac{\Delta P}{P_e} \cong 8.35 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{Q_v^{11/6}}{d^4 T_v} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P}{P_e}\right)^{0.714}$$

avec :

[C10]
$$\log \frac{P_e}{P_o} = \frac{-0.014827 \cdot z}{273.15 + T_v + 0.00325 \cdot z}$$

[C11]
$$T_v \cong T_e (1 + 0.378 H_r \frac{P_{vs}}{P_o})$$

Pour faire intervenir la pression au niveau de la mer (P_0), caractérisant les variations de pression atmosphérique, ainsi que l'altitude, les météorologistes emploient la formule ci-dessus. Ils introduisent alors la notion de température virtuelle (T_v) qui permet de caractériser l'air atmosphérique avec sa température (T_e), son humidité relative (H_r) et la pression de vapeur saturante (P_{vs}) donnée par des tables en fonction de la température. H_r et T_e sont des paramètres mesurés lors des essais (Singainy, 1992).

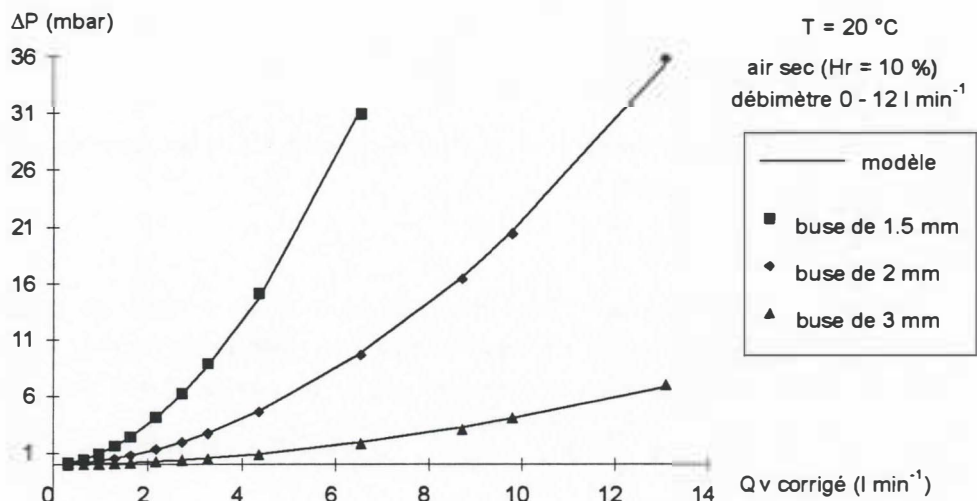


Figure C10 : Modélisation des différences de pression sur le fût étanche

A partir de ce modèle (figure C10), un abaque (figure C11) permet de représenter la différence de pression (ΔP), le débit d'air (Q_v) et le débit de fuite identifiable par un diamètre, sous forme de courbes (fonctions puissance). Les courbes de test d'étanchéité sur balle d'expérimentation sont de forme logarithmique. L'étanchéité de l'emballage diminue (augmentation du diamètre de fuite) avec l'augmentation des débits d'air et de la différence de pression. Contrairement au fût dont l'étanchéité est fixe pour une buse donnée, l'emballage sur balle se déforme et la fuite augmente avec les passages d'air entre les couches de film.

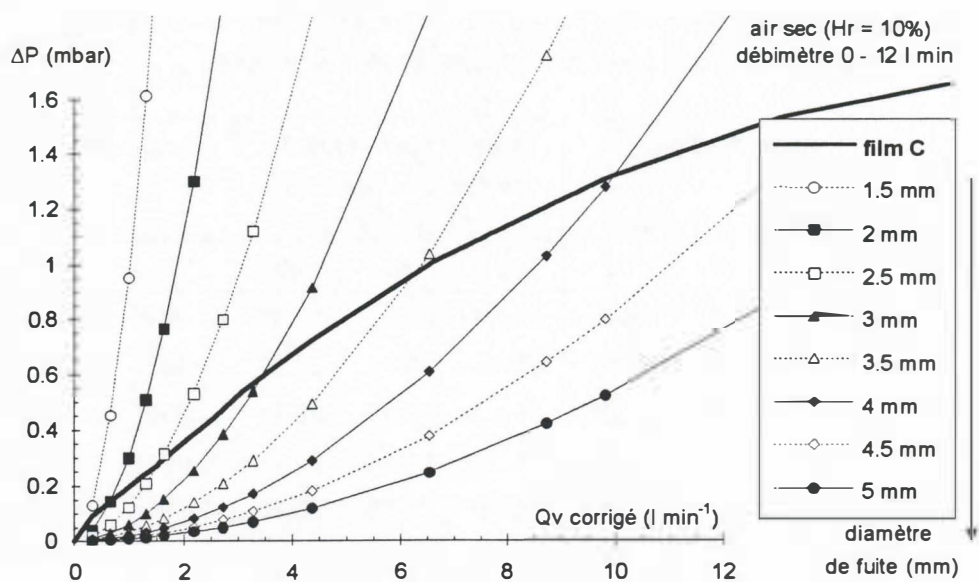


Figure C11 : Abaque pression - débit - diamètre de fuite et étanchéité du film C

Cas du CO₂

Dans les balles enrubannées, la majorité du gaz produit par les fermentations est du CO₂ (3^{ème} partie). Une expérience a donc été conduite sur fût étanche pour modéliser le comportement de ce gaz en regard des fuites. La liaison $K = f(Q_v)$ permet d'expliquer 88 % des variations du coefficient expérimental K_{CO_2} :

[C12] $K = 0.165 \cdot Q_v^{-1/6}$ (Q_v exprimé en $m^3 s^{-1}$).

[C13]
$$\frac{\Delta P_{CO_2}}{P_e} \cong 9.37 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{Q_v^{11/6}{}_{CO_2}}{d^4 T_v} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{CO_2}}{P_e}\right)^{0.714}$$

Dans le cas de débits et fuites équivalents, le rapport entre les coefficients K_{air} et K_{CO_2} permet le passage d'un gaz à l'autre :

[C14]
$$\frac{\Delta P_{CO_2}}{\Delta P_{air}} = 1.122$$

Les masses volumiques respectives des gaz interviennent dans ce rapport, en liaison avec les paramètres géométriques de l'expérience (caractéristiques de la buse, type d'écoulement). On peut donc faire intervenir les caractéristiques du gaz de la manière suivante :

[C15]
$$\frac{\Delta P_{CO_2}}{\Delta P_{air}} = \left(\frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{air}}\right)^{0.276} \cong \left(\frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{air}}\right)^{(\alpha-1)/\alpha} \quad \text{car : } \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{air}} = 1.518$$

A partir des équations C9, C13 et C15, la formule peut être étendue aux autres gaz :

[C16]
$$\frac{\Delta P_{gaz}}{P_e} \cong 8.35 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{\rho_{gaz}}{\rho_{air}}\right)^{0.276} \cdot \frac{Q_v^{11/6}{}_{gaz}}{d^4 T_v} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{gaz}}{P_e}\right)^{0.714}$$

Le coefficient expérimental devient donc :

[C17]
$$K_{gaz} = 8.35 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{\rho_{gaz}}{\rho_{air}}\right)^{0.276} \cdot Q_v^{-1/6}$$

Correction des débits pour l'air humide

Tableau C2 : Evolution du facteur de correction du débitmètre en fonction de la température et de l'humidité de l'air injecté

T	quantité d'eau			chaleur spécifique du mélange air-eau : Cp			Facteur de correction : Fc		
(°C)	(g d'eau kg ⁻¹ d'air)			(J mol ⁻¹ K ⁻¹)					
Hr (%)	10	50	90	10	50	90	10	50	90
10	0.7	3.8	6.8	29.16	29.31	29.45	0.999	0.994	0.989
15	1	5.3	9.55	29.18	29.37	29.57	0.998	0.992	0.985
20	1.35	7.25	13.1	29.19	29.47	29.74	0.998	0.989	0.980
25	1.9	9.85	18	29.22	29.59	29.96	0.997	0.985	0.972
30	2.6	13.35	24.45	29.25	29.75	30.26	0.996	0.979	0.963
35	3.45	17.8	33	29.29	29.95	30.66	0.995	0.973	0.95

Tests d'étanchéité sur films étirables

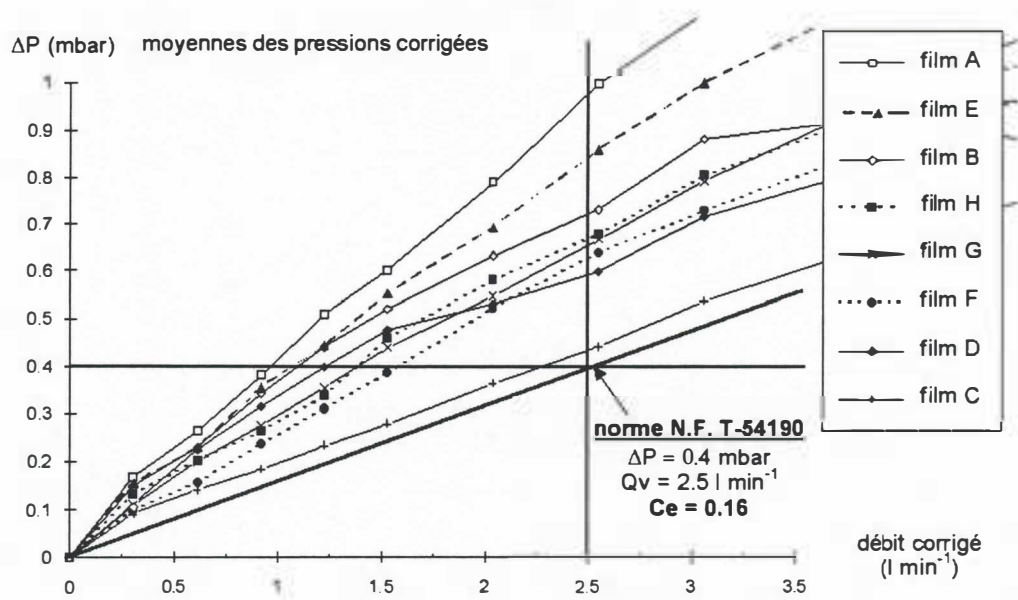


Figure C12 : Comparaison de l'étanchéité de plusieurs films étirables sur balle d'expérimentation

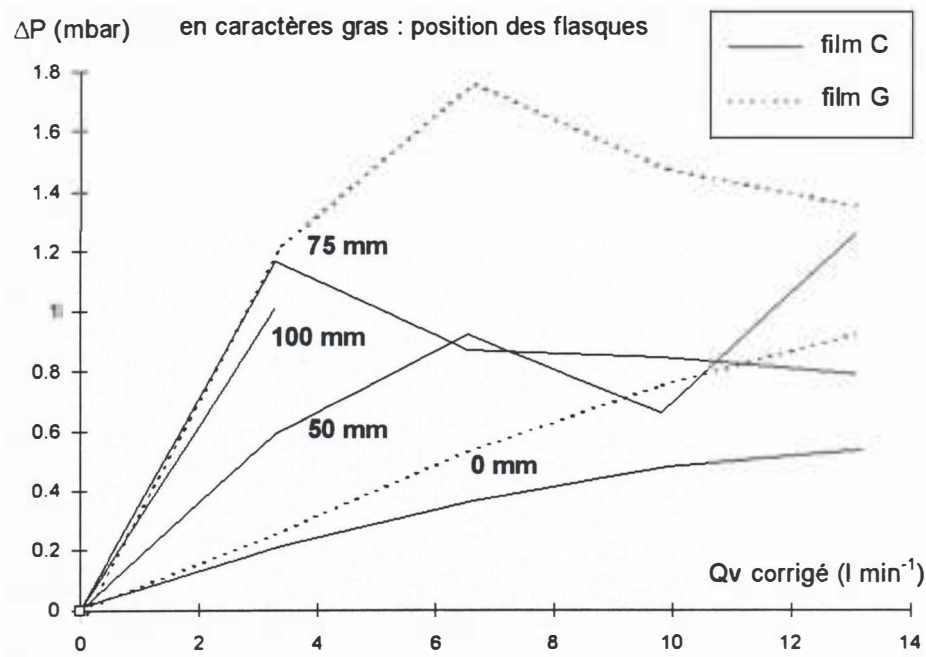


Figure C13 : Etanchéité sur balle d'expérimentation selon le bombage des faces planes : écartement central de 0, 50, 75 et 100 mm par rapport au plan normal

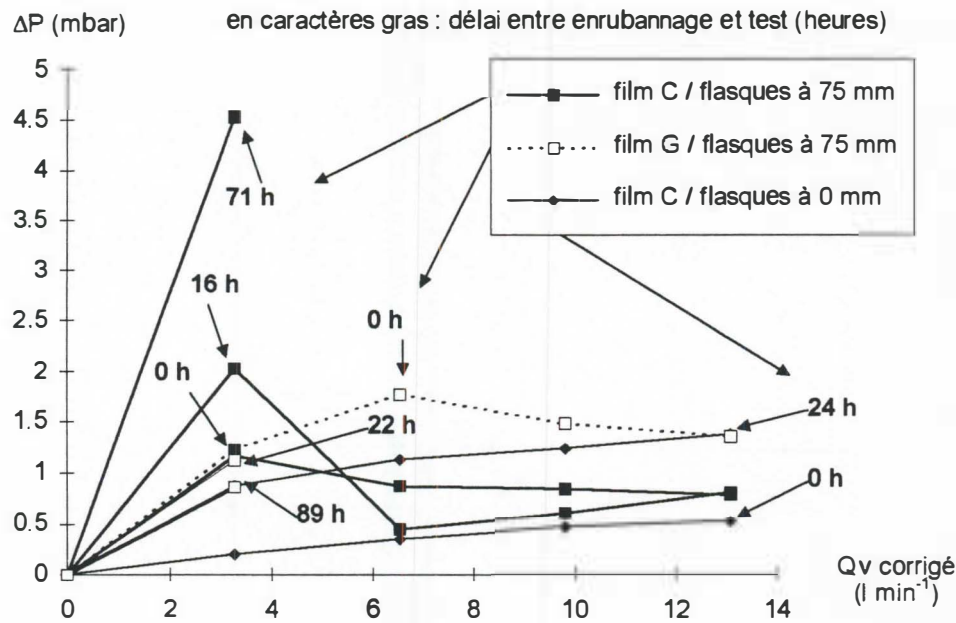


Figure C14 : Etanchéité sur balle d'expérimentation suivant le délai laissé entre l'enrubannage et le test d'étanchéité à l'air (0, 16 ou 71 h pour le film C avec flasques à 75 mm ; 0 ou 24 h pour le film C avec flasques à 0 mm ; 0, 22 ou 89 h pour le film G avec flasques à 75 mm)

Etude de la régularité d'étirage des films sur cadre

Le comportement des films à l'étirage peut être très variable d'un film à l'autre. Le principe d'extrusion du film peut avoir une influence sur ce comportement, comme le nombre de couches composant le film (Michallik, 1987 ; Savoie, 1987 ; Gaillard *et al.*, 1988 ; Watson, 1991 ; Daponte, 1992). Tous les films utilisés dans le cadre de cette étude sont obtenus sur filière annulaire. Parmi les six films testés, 3 sont des films tri-couches noirs : H, C et D, et 3 sont des films mono-couche : E (blanc) et F, G (verts). Les films C et G ont une largeur de 750 mm, les autres, une largeur de 500 mm.

Cet essai a été réalisé sur les cadres d'exposition. Pour étirer un film sur une longueur finale de 1600 mm, la longueur initiale est de 1440, 1000 et 727 mm pour un étirage à 10, 60 et 120 %, respectivement. Des petites marques adhésives ont été réparties tous les 200 mm de chaque côté du film. Les données obtenues sont des taux d'étirage de portions de film, calculés à partir de la mesure de l'allongement pour chaque segment de 200 mm, à gauche et à droite.

Tableau C3 : Incidence du taux d'étirage sur la réduction de largeur au centre du cadre (%) pour les différents films étudiés

Films		D	E	F	H	C	G
largeur (mm)		500	500	500	500	750	750
réduction de	0 %	6	4	6	6	4	4
largeur (%) pour	60 %	24	24	24	26	16*	25
les taux d'étirage	120 %	36	42	44	38	35	40

* résultat obtenu avec un étirage de 33 %

Les rapports de taux d'étirage, entre le côté gauche et le côté droit, constatées par portion de film (tableau C4), ont été obtenus en prenant la valeur absolue (x 100) du rapport :

$$\frac{\text{taux d'étirage côté droit}}{\text{taux d'étirage côté gauche}} - 1$$

Pour la plupart des films, on constate une augmentation des différences d'étirage gauche - droite (tableau C4) lorsque le taux d'étirage augmente surtout pour les films mono-couche, à l'exception du film G plus large. L'étirage est très irrégulier : certaines portions de film ne présentent aucune différence gauche - droite, alors que ces différences peuvent atteindre 13 % (étirage de 60 %) et 26 % (étirage de 120 %) pour d'autres portions.

Le coefficient de variation d'étirage représente la régularité de l'allongement du film sur le cadre (tableau C5) : un allongement régulier présente un C.V. d'étirage faible. Pour la plupart des films, à l'exception des films H et C, l'allongement est plus irrégulier avec un étirage fort. Les taux d'étirage des segments de films varient de 53 à 71.5 % pour un étirage à 60 % et de 86.5 à 151.5 % pour un étirage à 120 %. Les films mono-couche semblent plus sensibles à un étirage fort que les films tri-couches, à l'exception du film C qui présente la même irrégularité d'étirage aux taux de 33 % et de 120 %.

Tableau C4 : Symétrie d'étirage des films sur cadres d'exposition

taux d'étirage	portion de film (200 mm avant étirage)	rapport des taux d'étirage gauche et droite (%)					
		D	E	F	H	C*	G
60 %	1	8	5	6	6	0	0
	2	1	0	1	8	13	8
	3	1	0	11	2	5	0
	4	1	0	1	5	8	2
	5	9	5	3	7	10	5
rapport moyen gauche - droite		4	2	4	6	7	3
120 %	1	3	8	10	13	0	3
	2	7	24	26	2	0	6
	3	2	11	17	2	10	9
	4	11	6	2	11	11	1
	rapport moyen gauche - droite	6	12	14	7	5	5

* le film C a été étiré à 33 % au lieu de 60 % initialement prévu

Tableau C5 : Régularité d'allongement des films sur cadres d'exposition

taux d'étirage	portion de film (200 mm avant étirage)	taux d'étirage constatés (%)					
		D	E	F	H	C*	G
60 % prévu	1	60.0	55.5	53.0	63.0	44.0	55.0
	2	61.5	58.0	62.5	67.0	27.5	59.0
	3	57.5	58.0	56.5	62.0	31.5	60.0
	4	58.5	65.0	57.5	55.5	35.0	59.0
	5	63.5	65.5	71.5	54.5	29.0	67.5
C.V. du taux d'étirage (%)		3.6	6.7	10.7	7.8	17.6	6.8
120 % prévu	1	132.5	92.0	103	111.5	96	86.5
	2	117.5	146.0	143	129.0	123.0	113.0
	3	110.0	130.5	124.5	114.0	111.0	140.5
	4	119.5	111.0	109	125.5	151.5	139.5
	C.V. du taux d'étirage (%)	6.8	17.0	12.9	6.2	16.9	18.5

* le film C a été étiré à 33 % au lieu de 60 % initialement prévu

C.V. = coefficient de variation

Etude de la longévité des films étirables

Tableau C6 : Influence de la couleur sur la durée de vie des films étirables, sur cadres d'exposition, selon les sites

taux d'étirage	site	durée de vie selon les films étirables et la couleur (jours)							
		D	E	F	H	C	G	noire	claire
60%	Pl. des Cafres	433	82	67	238	363	433	345	194
	S ^t Pierre	155	237	179	113	139	413	136	276
	Montoldre	240	360	390	300			270	375
tous étirages confondus	Pl. des Cafres	372	127	112	252	281	279	302	173
	S ^t Pierre	227	257	191	130	128	413	162	287
	Montoldre	320	345	450	345			333	398

Tableau C7 : Caractéristiques météorologiques des deux sites de La Réunion durant la période d'exposition des films étirables sur cadres

site	S ^t Pierre				Plaine des Cafres			
	du 6/08/92 au 23/09/93				du 10/07/92 au 16/09/93			
	413				433			
caractéristiques météorologiques	mini / jour	maxi / jour	total période	par jour	mini / jour	maxi / jour	total période	par jour
températures extrêmes (°C)	12.3	33.7			-1.6	25.4		
température moyenne (°C)	16.8	27.2			3.8	21.2		
amplitude thermique (°C)	2.5	12.5			1.6	17.2		
durée d'insolation (h)					0	11.5		
rayonnement global (MJ m ⁻²)	0.3	31.1			0	33.0		
pluies (mm)	0	127.5			0	53.6		
somme des temp. moy. (°C)			9117	22.1			5594	12.9
somme des amplitudes (°C)			3476	8.4			4154	9.6
somme d'insolation (h)							2480	5.7
somme du ray. global (MJ m ⁻²)			7706	18.7			7266	16.8
somme des pluies (mm)			1253	3.0			1233	2.9

Les sommes de températures moyennes et du rayonnement global (tableau C8) sont augmentées avec l'altitude pour les films noirs tri-couches. Elles sont, par contre, très fortement diminuées pour les films clairs mono-couche. Hormis la température et le rayonnement global, la proportion d'U.V. dans le rayonnement intervient vraisemblablement sur la durée de vie des films clairs.

Tableau C8 : Comparaison des conditions climatiques subies par les différents films sur les deux sites d'exposition de La Réunion

films	site	durée de vie (jours)	somme des températures moyennes (°C)	somme des amplitudes thermiques (°C)	somme des durées d'insolation (heures)	somme du rayonnement global (MJ m ⁻²)
D	S ^t Pierre	227	4976	1962		4478
	Pl des Cafres	372	4855	3573	2134	6367
E	S ^t Pierre	257	5936	2211		5243
	Pl des Cafres	127	1467	1323	809	2335
F	S ^t Pierre	191	4358	1680		4143
	Pl des Cafres	112	1294	1146	710	2018
H	S ^t Pierre	130	2822	1162		2776
	Pl des Cafres	252	3421	2444	1465	4641
C	S ^t Pierre	128	2807	1142		2758
	Pl des Cafres	281	3785	2747	1646	5075
G	S ^t Pierre	413	9117	3476		7706
	Pl des Cafres	279	3589	2759	1680	5025

Lorsque tous les films sont confondus (tableau C9), la durée de vie et par conséquent les conditions climatiques subies, diminue avec le taux d'étirage. Cependant, on observe peu de différence entre un étirage de 10 % et un étirage de 60 % à la Plaine des Cafres. L'action du taux d'étirage est plus nette sur le site de S^t Pierre.

Tableau C9 : Comparaison des conditions climatiques subies par tous les films confondus selon le taux d'étirage, sur les deux sites d'exposition de La Réunion

taux d'étirage (%)	site	durée de vie (jours)	somme des températures moyennes (°C)	somme des amplitudes thermiques (°C)	somme des durées d'insolation (heures)	somme du rayonnement global (MJ m ⁻²)
10	S ^t Pierre	288	6489	2468		5720
10	Pl. des Cafres	253	3299	2515	1533	4664
60	S ^t Pierre	206	4582	1796		4225
60	Pl. des Cafres	269	3462	2613	1563	4606
120	S ^t Pierre	179	3937	1553		3607
120	Pl. des Cafres	189	2445	1868	1126	3461

ANNEXE D

Conservation des ensilages en balles enrubannées

Equipements nécessaires aux suivis des fermentations

Fixations des sondes

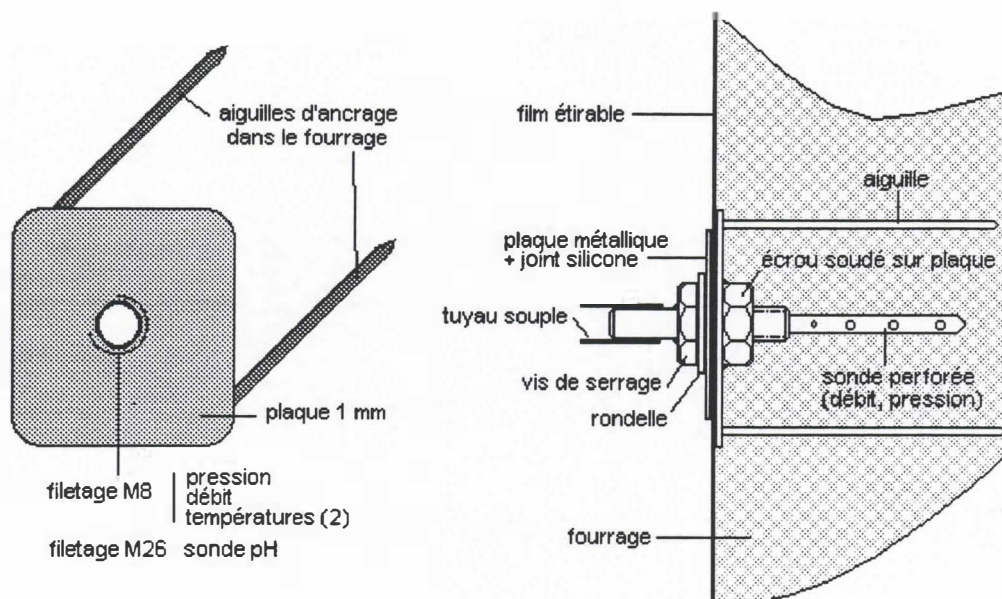


Figure D1 : Fixations des sondes dans la balle de fourrage

Capteurs de pesée

Un capteur (Captels) composé d'une jauge dynamométrique est relié à la centrale d'acquisition de données 21X. L'étendue de mesure de ce capteur est de 1000 kg et sa précision de 0.1 %. Pour apprécier la perte de poids des balles en cours de fermentation (quelques kg), il est nécessaire d'estimer le poids des balles avec davantage de précision. Pour ce faire, le programme de la centrale effectue une pesée toutes les 0.05 s et affiche une moyenne correspondant à 100 mesures toutes les 5 s ; l'enregistrement de 10 moyennes affichées permet d'obtenir 1000 pesées de la balle. La moyenne de ces 1000 pesées successives peut alors constituer un bon estimateur statistique du poids de la balle.

Pour les suivis de dessiccation (1^{ère} partie), un second capteur (Captels), dont l'étendue de mesure est de 50 kg et la précision de 0.1 %, est utilisé avec la même procédure d'acquisition de données.

Analyses descriptives de la conservation des ensilages

Matrice des corrélations

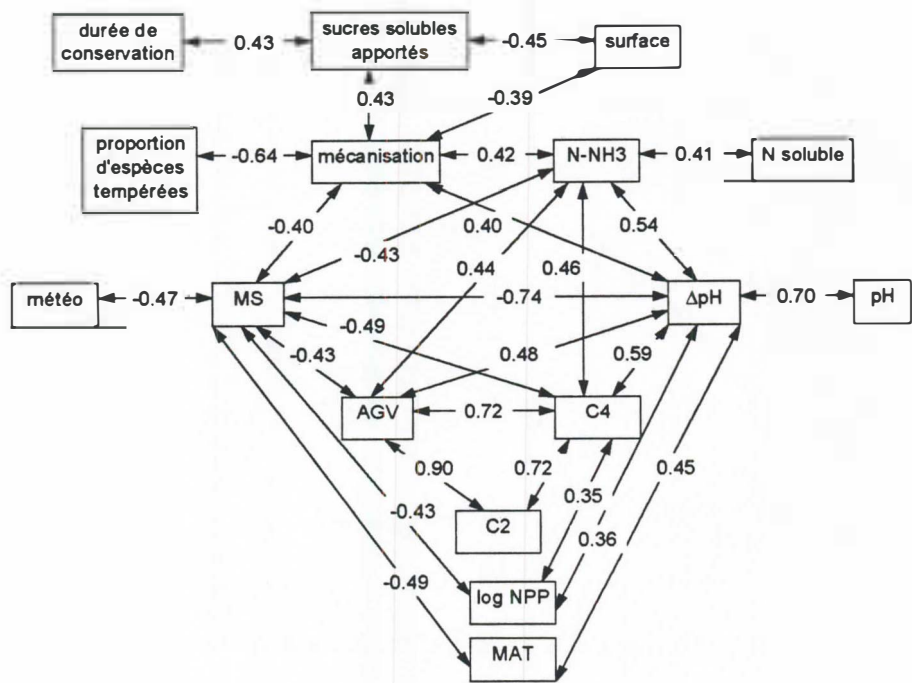


Figure D2 : Liaisons principales entre les variables (coefficients de régression : $r > 0.35$, $p < 0.001$)

Définition des modalités des variables pour l'AFCM

Tableau D1 : Définition des modalités pour les caractéristiques des chantiers

variables	libellé de modalité	nombre de balles	libellé de modalité	nombre de balles	libellé de modalité	nombre de balles
région*	HOJ	67	PLC	97	PLP	62
année	90	75	91	108	92+93	43
saison**	ETE	68	AUT	91	HIV	67
espèce***	RG	42	DAC	107	KIK	77

* HOJ = Hauts de l'Ouest et de S^t Joseph, PLC = Plaine des Cafres, PLP = Plaine des Palmistes
** ETE = été (mois de décembre à mars), AUT = automne (mois d'avril et mai), HIV = hiver (mois de juin à novembre)
*** RG = ray-grass + brome, DAC = dactyle + fétuque, KIK = kikuyu + autres tropicales (Chloris, Hemartria ...)

Tableau D2 : Définition des modalités pour les conditions de récolte

variables	modalité "faible"	libellé	nombre de balles	modalité "forte"	libellé	nombre de balles
apport de lisier	non	SLI	126	oui	LIS	100
ET (%)	< 50%	TRO	87	≥ 50%	TEM	139
RF (t MS ha ⁻¹)	< 3.5	RDF	117	≥ 3.5	RDE	109
stade	feuillu	FEU	126	épiaison ou stolons	EPI	100
MAT (g kg ⁻¹ MS)	< 125	MAF	106	≥ 125	MAE	120
météorologie	beau temps	SOL	81	nuageux à pluie	NUA	145
mécanisation	facile	FAC	147	difficile	DIF	79
fanage	sans	SFA	125	avec	FAN	101
apport SS (g kg ⁻¹ MS)	< 100	PML	104	≥ 100	BML	122

ET = proportion d'espèces tempérées ; RF = rendement fourrager ; MAT = teneur en matières azotées totales

SS = sucres solubles apportés

Tableau D3 : Définition des modalités pour les caractéristiques fermentaires

variables	modalité "faible"	libellé	nombre de balles	modalité "forte"	libellé	nombre de balles
durée de conservation	< 90 j	CRT	124	≥ 90 j	LON	102
teneur en MS (%)	< 27	MSF	95	≥ 27	MSE	131
pH	< 4.25	pHF	118	≥ 4.25	pHE	108
ΔpH	< 0	STA	146	≥ 0	INS	80
N soluble (% N total)	< 45	SOF	115	≥ 45	SOE	111
N-NH ₃ (% N total)	< 10	NHF	122	≥ 10	NHE	104
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	< 330	AGF	101	≥ 330	AGE	125
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	< 20	C2F	147	≥ 20	C2E	79
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	< 5	C4F	132	≥ 5	C4E	94
alcools (g kg ⁻¹ MS)	< 6	ALF	121	≥ 6	ALE	105
log (NPP)	< 3	LSF	64	≥ 3	LSE	130

Tableau D4 : Définition des modalités pour les notes synthétiques des ensilages

valeur / 20	<10 ou médiocre		10 à 13 ou moyen		13 à 16 ou bon		16 à 20 ou excellent	
notes synthétiques	libellé modalité	nb. de balles	libellé modalité	nb. de balles	libellé modalité	nb. de balles	libellé modalité	nb. de balles
stabilité	H10	81	H13	53	H16	44	H20	48
conservation	C10	56	C13	40	C16	69	C20	61
ingestibilité	I10	24	I13	41	I16	83	I20	78
qualité de l'azote	A10	48	A13	46	A16	62	A20	70

valeur /20	< 4 ou très mauvais		4 à 10 ou médiocre		10 à 20 ou bon	
note synthétique	libellé de modalité	nombre de balles	libellé de modalité	nombre de balles	libellé de modalité	nombre de balles
absence de spores	S4	84	S10	46	S20	64

Compléments aux analyses factorielles des correspondances multiples

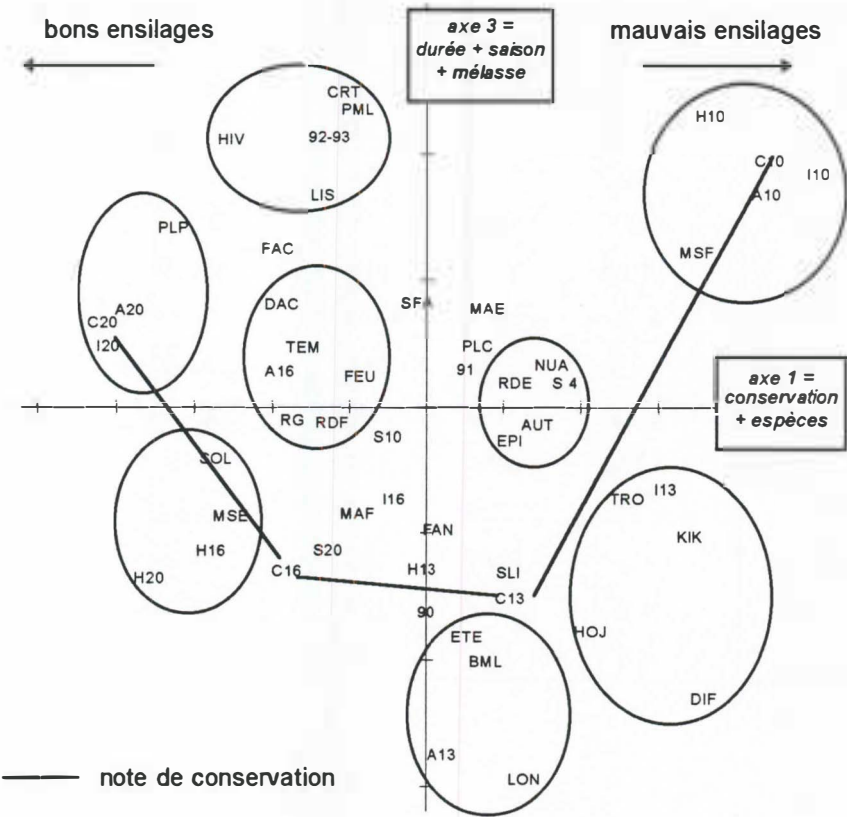


Figure D3 : Plan 1-3 de l'analyse factorielle des correspondances multiples représentant les conditions de récolte et les notes de conservation (inertie : axe 1 = 19 %, axe 2 = 8 %)

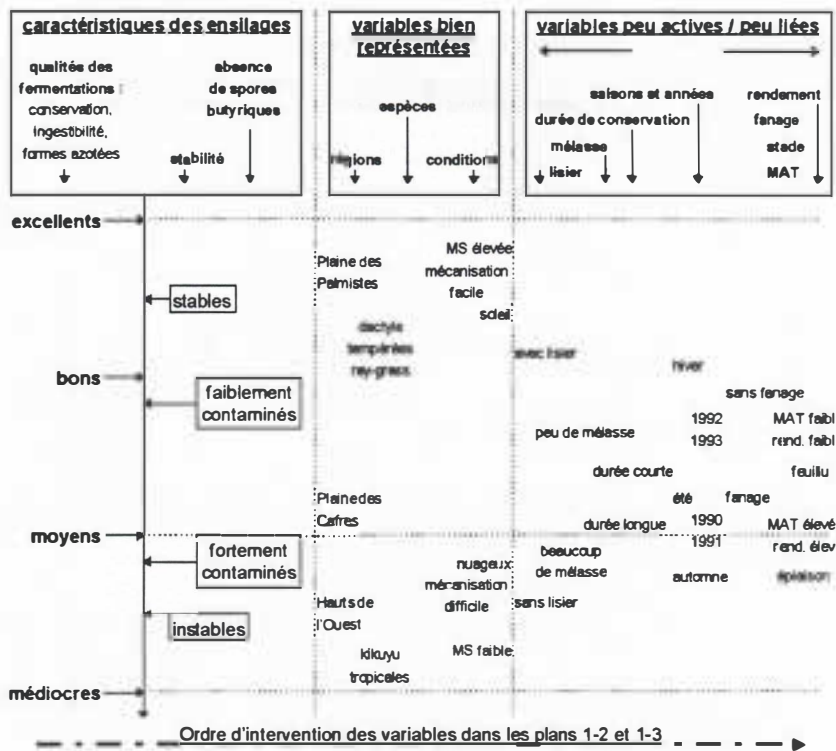
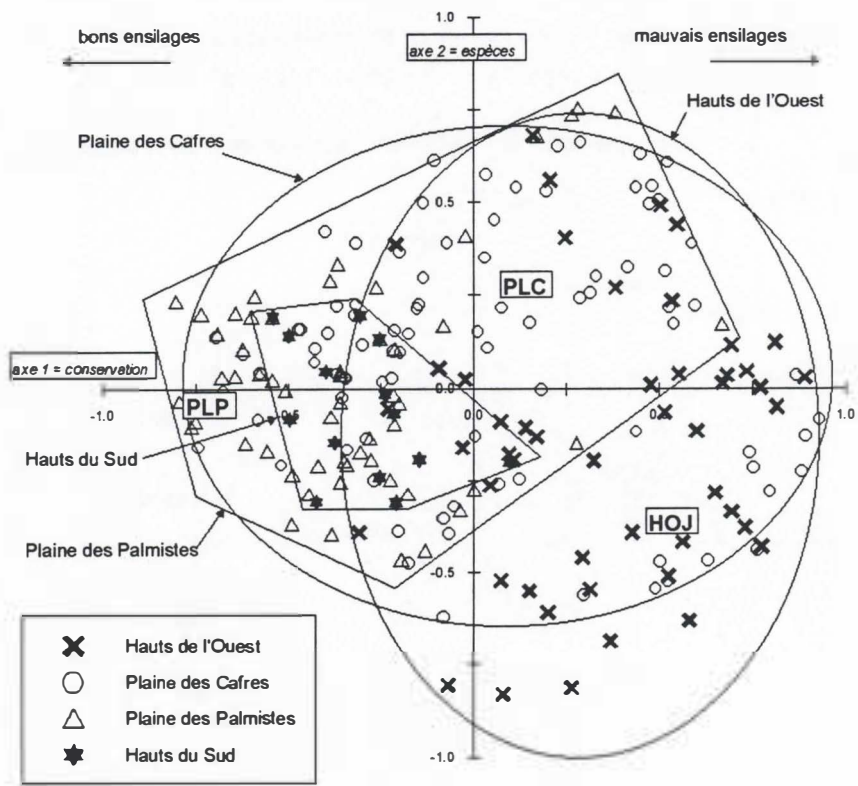


Figure D4. : Explication de la qualité des ensilages par le regroupement des modalités des variables définies dans l'AFM des notes de conservation



Légende : les inscriptions HOJ, PLC et PLP représentent les centres de gravité des régions Hauts de l'Ouest et du Sud, Plaine des Cafres et Plaine des Palmistes, respectivement

Figure D5 : Positionnement des individus par région dans le plan 1-2 de l'analyse factorielle des correspondances multiples des caractéristiques fermentaires

Analyses factorielles discriminantes

caractères gras soulignés = variables significativement discriminantes au seuil $p < 0.001$

caractères gras italiques = variables significativement discriminantes au seuil $p < 0.05$

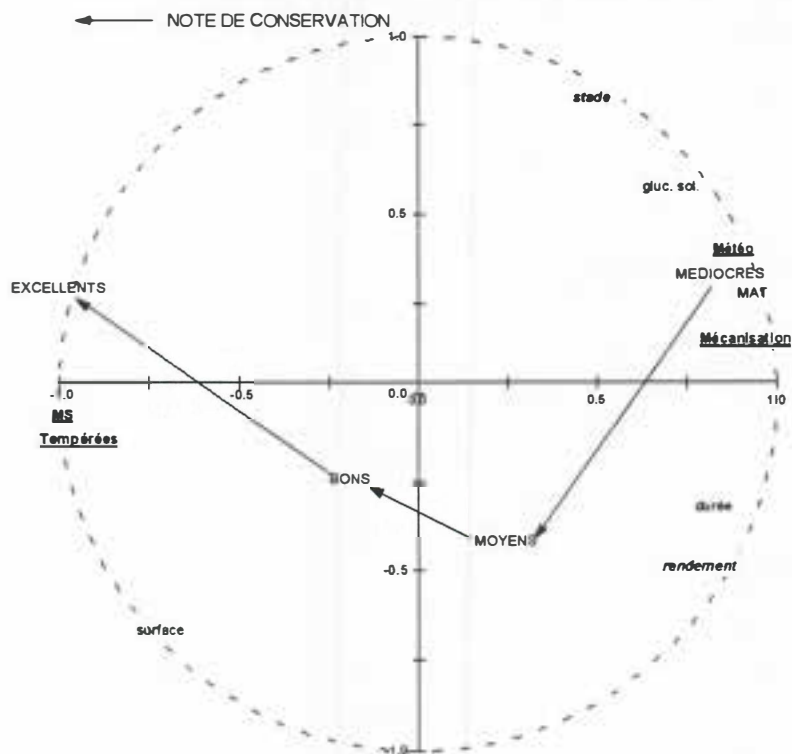


Figure D6 : Plan 1-2 de l'analyse factorielle discriminante de la note de conservation qualifiant les ensilages

variables significativement discriminantes en caractères gras soulignés : $p < 0.001$

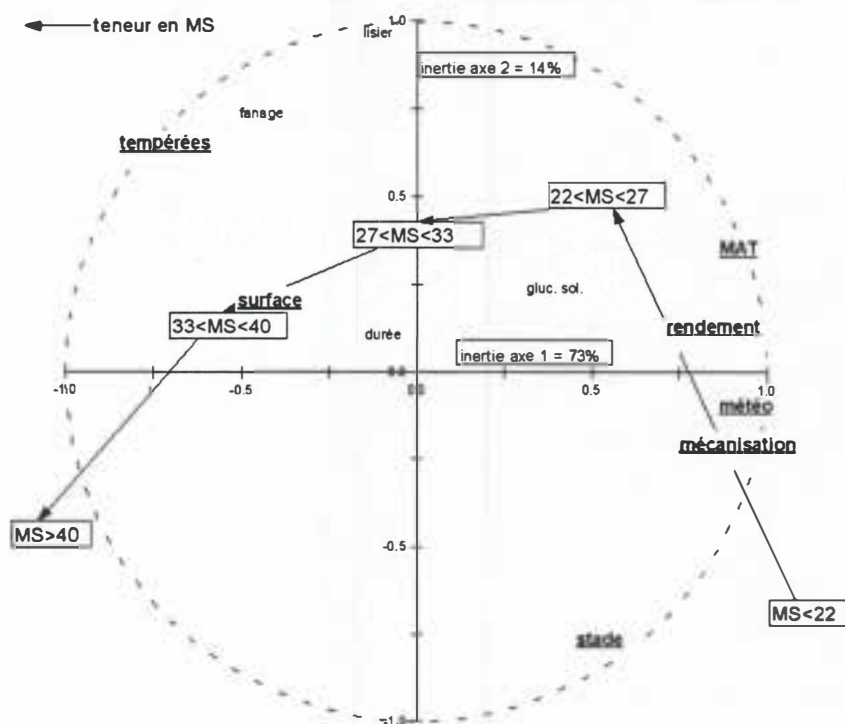


Figure D7 : Conditions de récolte discriminantes de la teneur en MS pour les balles enrubannées réalisées de 1990 à 1993

Etude de l'influence de la teneur en MS

Tableau D5 : Equations liant les caractéristiques de conservation à la teneur en MS pour l'ensemble des ensilages réalisés de 1990 à 1993 (à partir des résultats de l'enquête)

caractéristiques	équations : $y = \text{caractéristique}, x = \text{teneur en MS corrigée (\%)}$	r
pH	$y = 0.0014 x^2 - 0.098 x + 5.88 \pm 0.34$	0.42
ΔpH	$y = -1.39 \text{ Ln}(x) + 4.58 \pm 0.35$	0.77
N soluble (% N total)	$y = -8.81 \text{ Ln}(x) + 75.2 \pm 7.7$	0.33
N-NH ₃ (% N total)	$y = -10.02 \text{ Ln}(x) + 45.1 \pm 5.4$	0.50
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	$y = -363.4 \text{ Ln}(x) + 1646.9 \pm 248.8$	0.41
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	$y = -9.62 \text{ Ln}(x) + 50.9 \pm 11.2$	0.25
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	$y = -11.89 \text{ Ln}(x) + 46.9 \pm 7.0$	0.46
alcools (g kg ⁻¹ MS)	$y = -8.49 \text{ Ln}(x) + 37.3 \pm 9.6$	0.26
log (NPP) (g ⁻¹ MV)	$y = -2.15 \text{ Ln}(x) + 10.8 \pm 1.4$	0.42

Tableau D6 : Equations liant les caractéristiques fermentaires à la teneur en MS, pour du dactyle préfané récolté au stade épiaison, à la Plaine des Palmistes en décembre 1993

caractéristiques	équation : $y = \text{caractéristique}, x = \text{teneur en MS corrigée (\%)}$	r
pH	$y = 0.4 \text{ Ln}(x) + 2.72 \pm 0.17$	0.41
ΔpH	$y = -1.09 \text{ Ln}(x) + 3.39 \pm 0.17$	0.78
N soluble (% N total)	$y = -18.5 \text{ Ln}(x) + 107.2 \pm 4.3$	0.65
N-NH ₃ (% N total)	$y = -5.9 \text{ Ln}(x) + 28.7 \pm 1.2$	0.69
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	$y = -187.3 \text{ Ln}(x) + 796.4 \pm 48.7$	0.60
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	$y = -7.3 \text{ Ln}(x) + 31.8 \pm 2.7$	0.46
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	$y = -4.8 \text{ Ln}(x) + 19.3 \pm 1.3$	0.59
ac. lactique (g kg ⁻¹ MS)	$y = -33.4 \text{ Ln}(x) + 157.9 \pm 6.1$	0.73
alcools (g kg ⁻¹ MS)	$y = -7.4 \text{ Ln}(x) + 31.0 \pm 1.3$	0.73
log (NPP) (g ⁻¹ MV)	$y = -3.64 \text{ Ln}(x) + 15.6 \pm 1.1$	0.56

Tableau D7 : Conditions de récolte par classes de teneur en MS
pour les ensilages réalisés de 1990 à 1993 (à partir des résultats de l'enquête)

conditions de récolte	moyenne globale	classes de teneur en MS					sign. F
		< 22%	22 à 27%	27 à 33%	33 à 40%	> 40%	
nombre de balles	226	41	54	43	44	44	
mécanisation (1 à 4)	2.1	2.7 ^c	2.2 ^b	2.1 ^b	2.0 ^{ab}	1.7 ^a	***
météo (1 à 4)	1.9	2.6 ^d	2.2 ^c	1.7 ^b	1.8 ^b	1.4 ^a	(***)
apport SS (g kg ⁻¹ MS)	107	110	115	96	110	102	ns
espèces temp. (%)	60.2	26.3 ^a	61.1 ^b	72.6 ^b	72.5 ^b	66.1 ^b	***
stade récolte (1 à 5)	2.1	3.3 ^c	1.8 ^{ab}	1.9 ^{ab}	1.4 ^a	2.2 ^b	***
rendement (t MS ha ⁻¹)	3.8	4.2 ^b	4.4 ^b	3.6 ^a	3.2 ^a	3.3 ^a	(***)
MAT (g kg ⁻¹ MS)	130	142 ^c	145 ^{cd}	130 ^{bc}	124 ^b	107 ^a	(***)

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil $p < 0.05$

() = hypothèse d'égalité des variances rejetée

SS = sucres solubles

Tableau D8. : Influence de la teneur en MS sur les caractéristiques fermentaires de l'ensilage,
pour du dactyle récolté au stade épiaison avec un apport de sucres solubles
correspondant à 40 g kg⁻¹ MS, à la Plaine des Palmistes en décembre 1993

caractéristiques de fermentation	balle à 30% MS	balle à 48% MS	caractéristiques de fermentation	balle à 30% MS	balle à 48% MS
poids brut (kg)	519	358	pH	4.17	4.35
poids MS (kg)	156	172	Δ pH	- 0.24	- 0.78
quantité d'air (l)	890	1060	N soluble (% N total)	43.9	39.0
pertes de poids (kg)	4.7	3.9	N-NH3 (% N total)	8.2	6.0
pertes (% poids brut)	0.9	1.1	AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	175	90
pertes (% poids sec)	3.0	2.3	C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	9.5	4.7
température maxi (°C)	26	30	C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	1.2	0.6
débit maxi (l min ⁻¹)*	0.5	0.7	ac. lact. (g kg ⁻¹ MS)	55.4	33.9
volume fuite (l d'air)*	806	1672	alcools (g kg ⁻¹ MS)	6.9	3.9
dégagement CO ₂ (kg)*	1.1	2.3	NPP (spores g ⁻¹ MV)	93	93

* = valeurs très largement sous-estimées en raison des ruptures d'étanchéité pendant la phase de respiration

Etude de l'influence de l'espèce fourragère

Tableau D9 : Conditions de récolte des ensilages en balles enrubannées (1990 à 1993), pour différentes espèces fourragères, en distinguant deux classes de teneur en MS (à partir des résultats de l'enquête § III.2.1.1.)

conditions de récolte	teneur en MS < 27%				teneur en MS ≥ 27%			
	RG brome	dactyle fétuque	kikuyu	sign. F	RG brome	dactyle fétuque	kikuyu	sign. F
nombre de balles	13	34	43		29	73	22	
mécanisation (1 à 4)	2.0 ^a	2.2 ^a	2.7 ^b	**	1.8 ^a	1.6 ^a	2.9 ^b	(***)
météo (1 à 4)	2.5	2.2	2.3	ns	1.4	1.6	1.5	ns
apport SS (g kg ⁻¹ MS)	86	107	118	ns	99	99	109	ns
stade (1 à 5)	2.2 ^a	1.5 ^a	3.2 ^b	(***)	1.4	2.0	2.0	ns
rend. en MS (t ha ⁻¹)	5.1 ^b	4.5 ^{ab}	4.0 ^a	*	2.9 ^a	3.5 ^b	3.8 ^b	**
MAT (g kg ⁻¹ MS)	163 ^b	144 ^{ab}	133 ^a	(*)	139 ^b	118 ^a	112 ^a	(**)

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

les valeurs présentant les mêmes lettres en exposant ne sont pas différentes au seuil p < 0.05

() = hypothèse d'égalité des variances rejetée

SS = sucres solubles ; RG = ray-grass

Le kikuyu présente des conditions de mécanisation difficiles (stolons, feuilles étroites et courtes, tapis végétal). De plus, il est souvent implanté sur des zones accidentées. Les conditions météorologiques sont similaires entre espèces, et meilleures pour les ensilages préfanés (MS ≥ 27%). L'apport de sucres solubles (mélasse) est comparable entre espèces et normalement suffisant en moyenne. Le stade de récolte du kikuyu humide est tardif (stolons). Des rendements et teneurs en MAT plus élevés caractérisent les ensilages humides. L'effet saison et des fertilisations élevées pourraient expliquer que les rendements élevés s'accompagnent d'une teneur en MAT élevée ; le rendement augmentant avec l'âge de repousse, on aurait pu logiquement s'attendre à l'inverse.

Etude de l'influence de l'apport de sucres solubles

Tableau D10 : Influence de l'apport de sucres solubles (40 g kg⁻¹ de MS) sur du dactyle récolté au stade épiaison, selon deux teneurs en MS, à la Plaine des Palmistes, en décembre 1993

caractéristiques de conservation	teneur en MS < 30 %			teneur en MS > 40 %		
	sans mélasse	avec mélasse	signif. T	sans mélasse	avec mélasse	signif. T
teneur en MS (%)	28.4	30.2	ns	44.4	45.3	ns
pH	4.02	3.94	ns	4.27	4.15	ns
ΔpH	-0.30	-0.44	ns	-0.66	-0.84	ns
N soluble (% N total)	45.8	40.6	ns	36.6	34.9	ns
N-NH ₃ (% N total)	9.3	7.4	ns	7.4	5.7	*
AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	132	185	ns	68	79	ns
C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	5.1	9.7	ns	3.2	4.3	ns
C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	3.8	1.3	(*)	1.2	0.7	ns
ac. lactique (g kg ⁻¹ MS)	44.7	54.2	*	27.1	32.8	ns
alcools (g kg ⁻¹ MS)	5.8	6.3	ns	2.1	3.7	ns
NPP (spores g ⁻¹ MV)	140000	42000	ns	95	67	ns
log (NPP)	5.1	3.8	ns	1.9	1.7	ns

ns = non significatif ; * = significatif au seuil 0.05 ; ** = significatif au seuil 0.01 ; *** = significatif au seuil 0.001

() hypothèse d'égalité des variances rejetée

L'influence de la teneur en MS sur les fermentations est remarquée à nouveau. Bien que les différences ne soient pas significatives, l'apport de sucres solubles semble augmenter les fermentations lactiques hétérofermentaires (acide acétique et alcools) et diminuer la production d'acide butyrique et d'azote ammoniacal, et la contamination en spores butyriques

Etude de l'influence de l'incorporation d'un conservateur biologique

Tableau D11 : Comparaison (essai F5) de deux balles (T2 et T6) de dactyle (D1), récolté au stade feuillu avec une teneur en MS de 21 %, à la Plaine des Cafres en mars 1993

caractéristiques de fermentation	T2	T6	caractéristiques de fermentation	T2	T6
poids brut (kg)	745	722	teneur en MS (%)	21.4	21.1
poids MS (kg)	159	152	pH	4.04	4.17
quantité d'air (l)	670	690	ΔpH	-0.02	0.13
pertes de poids (kg)	2.7	2.3	N soluble (% N total)	45.4	43.7
pertes (% poids brut)	0.4	0.3	N-NH3 (% N total)	11.4	12.6
pertes (% poids sec)	1.7	1.5	AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	226	241
température maxi (°C)	27	27	C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	11.5	10.6
débit maxi (l min ⁻¹)*	1.0	1.0	C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	2.2	4.4
volume fuites (l d'air)*	1028	1604	alcools (g kg ⁻¹ MS)	5.7	7.7
dégagement CO ₂ (kg)*	1.4	2.2	NPP (spores g ⁻¹ MV)	93	3

* = valeurs très largement sous-estimées en raison des ruptures d'étanchéité pendant la phase de respiration

Tableau D12 : Comparaison (essai F8) de deux balles (T2 et T6) de dactyle (D2), récolté au stade feuillu, avec une teneur en MS de 30 %, à la Plaine des Cafres en juin 1993

caractéristiques de fermentation	T2	T6	caractéristiques de fermentation	T2	T6
poids brut (kg)	757	586	pH	4.06	4.04
poids MS (kg)	215	199	ΔpH	-0.24	-0.49
quantité d'air (l)	670	700**	teneur en MS (%)	28.4	34.0
pertes de poids (kg)	4.5	3.8	N soluble (% N total)	45.4	61.3
pertes (% poids brut)	0.6	0.6	N-NH3 (% N total)	8.7	9.7
pertes (% poids sec)	2.1	1.9	AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	138	67
température maxi (°C)	24	24	C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	7.9	3.8
débit maxi (l min ⁻¹)*	0.9	0.3	C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	0.3	0.1
volume fuites (l d'air)*	2441	1168	alcools (g kg ⁻¹ MS)	5.1	6.0
dégagement CO ₂ (kg)*	3.3	1.6	ac. lact. (g kg ⁻¹ MS)	108.7	66.5
			NPP (spores/g)	240	9

* = valeurs très largement sous-estimées en raison des ruptures d'étanchéité pendant la phase de respiration

** = la balle T6 présente un volume inférieur de 10 % (1220 l au lieu de 1360 l) lié à un défaut de pressage

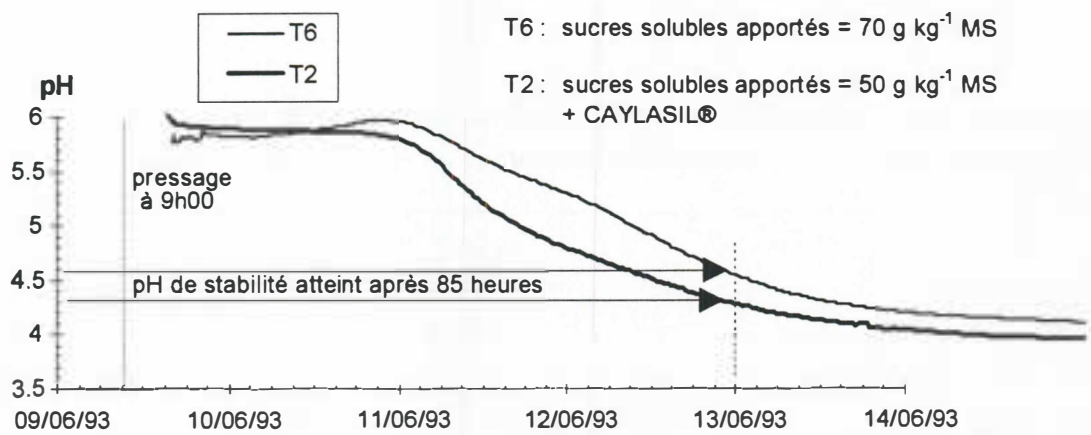


Figure D8 : Suivi du pH (essai F8) de deux balles (T2 et T6) de dactyle (D2) récolté au stade feuillu, avec une teneur en MS de 30 %, à la Plaine des Cafres en juin 1993

Pour ce dactyle plutôt sec (MS = 30 %) la baisse du pH s'est déclenchée tardivement, si l'on compare les courbes d'acidification avec celles du kikuyu humide récolté à 20 % de MS (document principal - figure 23 - p 139). Nous avons vu que l'augmentation de la teneur en MS diminue les fermentations, elle réduit aussi l'intensité de l'acidification lactique.

Tableau D13 : Comparaison (essai F6) de deux balles (T2 et T6) de kikuyu (K1), récolté avec beaucoup de stolons, avec une teneur en MS de 20 %, à la Plaine des Cafres en avril 1993

caractéristiques de fermentation	T2	T6	caractéristiques de fermentation	T2	T6
poids brut (kg)	786	731	pH	4.54	4.43
poids MS (kg)	175	157	ΔpH	0.48	0.40
quantité d'air (l)	630	680	teneur en MSc (%)	22.3	21.5
pertes de poids (kg)	9.1	9.1	N soluble (% N total)	45.3	59.4
pertes (% poids brut)	1.2	1.2	N-NH3 (% N total)	15.9	17.5
pertes (% poids sec)	5.2	5.8	AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	397	234
température maxi (°C)	28	28	C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	9.6	5.7
débit maxi (l min ⁻¹)*	0.6	0.5	C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	17.4	10.3
volume fuites (l d'air)*	3095	1005	alcools (g kg ⁻¹ MS)	11.9	19.5
dégagement CO ₂ (kg)*	4.3	1.4	NPP (spores g ⁻¹ MV)	3	7

* = valeurs très largement sous-estimées en raison des ruptures d'étanchéité pendant la phase de respiration

Tableau D14 : Comparaison (essai F7) de deux balles (T2 et T6) de kikuyu (K2), récolté au stade feuillu, avec une teneur en MS de 22 %, à la Plaine des Cafres en mai 1993

caractéristiques de fermentation	T2	T6	caractéristiques de fermentation	T2	T6
poids brut (kg)	716	706	pH	4.47	4.73
poids MS (kg)	164	162	ΔpH	0.38	0.64
quantité d'air (l)	700	710	teneur en MSc (%)	22.9	23.0
pertes de poids (kg)	6.0	6.5	N soluble (% N total)	57.1	61.5
pertes (% poids brut)	0.8	0.9	N-NH3 (% N total)	11.9	12.7
pertes (% poids sec)	3.7	4.0	AGV (mmol kg ⁻¹ MS)	181	129
température maxi (°C)	25	25	C ₂ (g kg ⁻¹ MS)	9.7	5.3
débit maxi (l min ⁻¹)*	2.1	1.8	C ₄ (g kg ⁻¹ MS)	1.4	2.6
volume fuites (l d'air)*	1788	2345	alcools (g kg ⁻¹ MS)	7.6	13.0
dégagement CO ₂ (kg)*	2.4	3.2	NPP (spores g ⁻¹ MV)	23	1100

* = valeurs très largement sous-estimées en raison des ruptures d'étanchéité pendant la phase de respiration

Comparaison de différentes techniques d'ensilage

Tableau D15 : Comparaison des conditions moyennes de récolte d'ensilages réalisés avec différentes techniques

conditions de récolte	coupe directe		ressuyé	balles
	fléaux	double - coupe	coupe - fine	enrubannées
longueur des brins	longs	moyens	courts	entiers
nombre de silos (ou balles)	26	17	8	226*
mécanisation (1 à 4) ⁽¹⁾	2.7	1.6	1.5	2.1
météo (1 à 4) ⁽²⁾	1.8	1.8	2.3	1.9
proportion d'esp. temp. (%)	49	81	92	60
MAT (g kg ⁻¹ MS)	133	140	146	130
stade (1 à 5) ⁽³⁾	2.6	2.3	2.8	2.1

* les 226 balles récoltées correspondent à 60 chantiers de récolte (équivalent des silos)

(1) facile = 1 ; assez facile = 2 ; assez difficile = 3 ; difficile = 4

(2) beau temps = 1 ; nuageux = 2 ; couvert = 3 ; pluie = 4

(3) feuillu = 1 ; montaison = 2 ; début épiaison = 3 ; épiaison = 4 ; floraison (ou stolons pour le kikuyu) = 5

ANNEXE E

Coût de revient de l'ensilage en balles enrubannées

Réalisation des ensilages

Depuis février 1990, l'ensilage en balles enrubannées est réalisé à La Réunion principalement dans trois zones d'élevage (tableaux E1 et E2) : les Hauts de l'Ouest, la Plaine des Cafres et la Plaine des Palmistes ; quelques ensilages sous film étirable ont également été réalisés dans les Hauts du Sud en 1990 et à nouveau en 1993. Globalement, le rendement fourrager était plus faible en 1990 (stade de récolte plus précoce) et la teneur en MS supérieure, d'où un nombre de balles par hectare plus faible, sauf pour les Hauts de l'Ouest. Le nombre de balles par chantier est plus faible à la Plaine des Cafres, en raison des petites parcelles et du plus grand nombre d'éleveurs concernés. Sur les deux années de suivi, la Plaine des Cafres a réalisé 40 % des chantiers, mais seulement 23 % des balles, alors que les Hauts de l'Ouest et la Plaine des Palmistes ont réalisé, pour chacune des régions, 26 % des chantiers, mais 37 % des balles.

Tableau E1 : Chantiers d'ensilage en balles enrubannées réalisés en 1990

région	nombre de chantiers	nombre de balles	surface (ha)	nombre de balles par chantier	nombre de balles par ha
Hauts de l'Ouest	5	103	4.5	20.6	22.9
Plaine des Cafres	9	99	7.5	11.0	13.2
Plaine des Palmistes	5	70	6.0	14.0	11.7
Hauts de Sud	4	40	2.5	10.0	16.0
St Pierre	1	26	1.5	26.0	17.3
TOTAL	24	338	22.0	14.1	15.4

Tableau E2 : Chantiers d'ensilage en balles enrubannées réalisés en 1991

région	nombre de chantiers	nombre de balles	surface (ha)	nombre de balles par chantier	nombre de balles par ha
Hauts de l'Ouest	13	603	27.7	46.4	21.8
Plaine des Cafres	17	339	21.3	19.9	15.9
Plaine des Palmistes	12	640	29.6	53.3	21.6
TOTAL	42	1582	78.6	37.7	20.1

Mesures

Pesée des balles

Les pèse-essieux hydrauliques ont une précision de 25 kg (appréciation de la demi-division). L'erreur commise sur la pesée de l'enrubanneuse à vide (1300 kg), par les trois pèse-essieux, est de 75 kg, l'erreur sur l'enrubanneuse chargée (1300 kg + 644 kg correspondant au poids moyen des balles en 1990) est également de 75 kg. L'erreur moyenne commise sur le poids des balles est donc de 9.7 % (soit 62 kg pour une balle moyenne de 644 kg).

La pesée hydraulique, sur vérin de déchargement de l'enrubanneuse, met en oeuvre un système plus complexe (figure E1) qu'il a fallu étalonner en pesant une balle, séparée par morceaux, sur une balance à fléaux. Le protocole de pesée hydraulique, comprenant trois répétitions, doit être respecté pour avoir une mesure fiable :

- positionnement de la balle sur la plate-forme, en position centrale,
- levée de la plate-forme pour faire coïncider les repères,
- verrouillage avec la vanne pour isoler le circuit de pesée,
- blocage de l'aiguille du manomètre,
- lecture du poids (précision de 5 kg correspondant à une demi-division),
- descente de la plate-forme, après ouverture de la vanne, entre chaque mesure.

La répétition de 20 mesures de pesée de la balle de fourrage, prise comme étalon, sur l'enrubanneuse équipée du système de pesée Hydrokit (avec repérage préalable) a donné un poids moyen de 809 kg avec un écart-type de 22.5 kg (CV = 2.8 %). La pesée sur une balance précise à 50 g, après déroulage de cette même balle (35 pesées dans un récipient), a donné un poids de 721.37 kg avec une erreur sur la mesure de ± 3.5 kg (0.5 %). Le cadran de mesure a ensuite été tracé : angle d'aiguille du manomètre pour la plate-forme à vide = 40.9° , angle pour 721.37 kg = 254.8° , soit 35.3° pour 100 kg de fourrage.

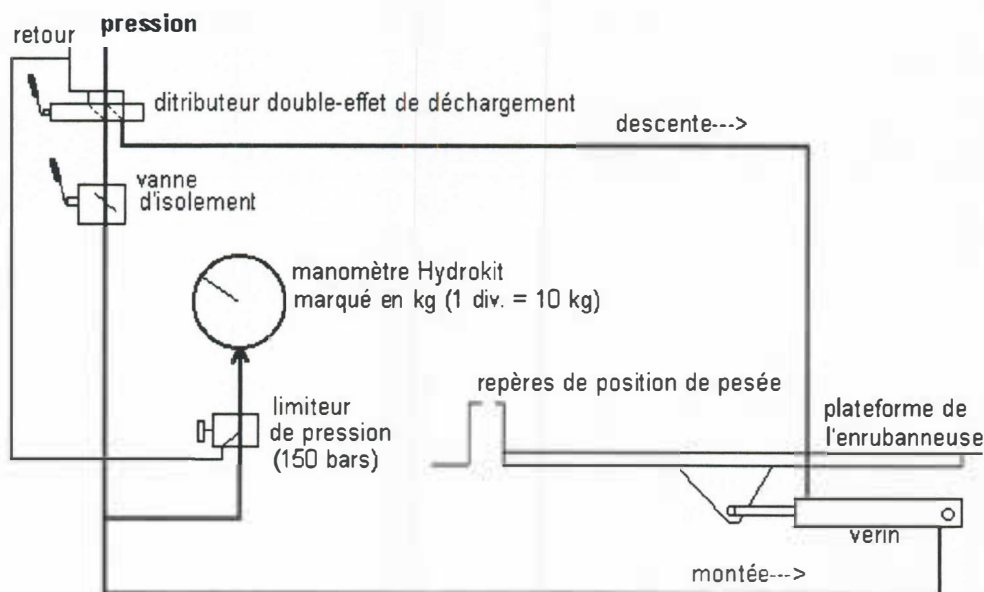


Figure E1 : Montage du manomètre de pesée Hydrokit

Détermination de la teneur en MS avec le four à micro-ondes

La précision de la pesée des échantillons est médiocre car leurs poids sont faibles (poids vert de 150 g et poids sec de 30 g pour une teneur en MS de 20 %), et la balance n'est précise qu'à ± 2 g. L'erreur commise sur la mesure de la teneur en MS par cette méthode est donc de l'ordre de 8 %.

41 échantillons d'ensilage d'herbe compris entre 18 % et 50 % de MS, ont servi à étalonner le four à micro-ondes utilisé en respectant le protocole opératoire (Corrot, 1991). La régression entre les valeurs déterminées au four à micro-ondes et les mesures à l'étuve (80 °C pendant 24 heures, précision sur la pesée des échantillons de 0.1 g pour des échantillons pesant en moyenne 500 g) donne : $MS_{\text{micro-ondes}} = 0.997 \times MS_{\text{étuve}}$ ($r^2 = 0.977$, $p < 0.001$). Cependant, la correction établie par Corrot (1991) sur des fourrages verts s'avère légèrement différente dans le cas des ensilages d'herbe : en effet, il faut enlever 0.5 % de MS, au lieu de 1 % dans la méthode décrite par Corrot (1991), à la valeur obtenue après pesées, pour une teneur en MS inférieure à 40 % (Paillat *et al.*, 1992).

Calculs des coûts des tracteurs

Le coût d'un tracteur appartenant à l'éleveur ou utilisé dans le cadre de l'entraide est de 48 F h⁻¹ pour les coûts fixes, et de 54 F h⁻¹ pour les coûts variables. Ces coûts résultent de la simulation ($n = 12$) de différentes situations d'utilisation de tracteurs de 65 à 85 ch en exploitations d'élevage, selon les barèmes proposés par l'I.G.E.R. et le B.C.M.E.A. (Fiévet, 1982) corrigés pour La Réunion en ce qui concerne les frais de réparations et de pneumatiques. La main d'oeuvre de l'éleveur ou de l'entraide a été fixée à 50 F h⁻¹ (environ le SMIC + charges en 1991) et constitue un coût fixe (main d'oeuvre toujours présente sur l'exploitation). L'entreprise facture ses services (tracteur + chauffeur) à 250 F h⁻¹ (coût variable), suivant le cours du marché, pour des tracteurs de forte puissance (90 à 120 ch).

Temps de travaux

Les temps de travaux exposés sont ceux mesurés en 1990 et 1991. En 1992 et 1993, les mesures ont été trop ponctuelles pour être comparées. Ils comprennent les temps de travail effectif et de manoeuvres, mais excluent les temps de pannes ou de réglages.

Résultats par opération de récolte

On peut distinguer autant d'opérations de récolte que de matériels utilisés : la fauche et le conditionnement, le fanage, l'andainage, l'épandage de mélasse, le pressage, l'enrubannage, la manutention et le transport (Paillat *et al.*, 1990 ; Lepetit, 1992).

Fauche et conditionnement

Cette opération est réalisée par une faucheuse à disques équipée d'un conditionneur à doigts : Kuhn FC44 (Höhn, 1981) d'une largeur de coupe de 1.50 m, en mauvais état, en 1990, et Kuhn FC202 (Höhn, 1988) d'une largeur de coupe de 2.10 m, en 1991. Afin d'éviter les bourrages, la pression du conditionneur a dû être réduite au minimum pour faucher le kikuyu. Les temps de fauche (tableau E3) demeurent élevés comparativement à ceux mesurés, en Martinique, avec du matériel identique : 1:10 h ha⁻¹ (Royer *et al.*, 1992, 1993), ou au CEMAGREF à Montoldre : 1 h ha⁻¹ (Gaillard *et al.*, 1989b). La topographie et la mauvaise aptitude de certains fourrages à la fauche, notamment du kikuyu, en sont les causes essentielles. Les conditions de chantier ont été moins variables en 1990, car un choix sévère des parcelles à récolter a été réalisé, alors qu'en 1991, tous les éleveurs ont pu réaliser des balles enrubannées selon leur souhait (Paillat *et al.*, 1990 ; Lepetit *et al.*, 1991).

Tableau E3 : Temps de travaux pour la fauche en 1990 et 1991

	temps / ha (h:min)		temps / balle (min)		temps / t MS (min)	
	1990	1991	1990	1991	1990	1991
Nb de chantiers	21	38	21	38	18	30
Moyenne	3:07	2:07	13.0	6.1	61.5	36.9
Ecart-type	1:03	0:55	5.0	3.3	18.0	17.6

Fanage et andainage

Les temps de travaux pour le fanage (tableau E4) sont peu variables d'une année à l'autre et sont élevés pour les mêmes raisons que pour la fauche. Les critères temps par hectare et temps par tonne de MS récoltée semblent moins variables. Les temps d'andainage (tableau E5) sont également très élevés par rapport à ceux de Martinique : 0:38 h ha⁻¹ (Royer *et al.*, 1992). Il est en effet difficile de réaliser des andains homogènes et droits dans des parcelles exiguës, à la topographie accidentée. Les stolons du kikuyu rendent l'andainage très difficile. Entre 1990 et 1991, la réduction des temps d'andainage par rapport au produit traité a été assez notable (-32 %), en relation avec des rendements fourragers plus élevés et des stades plus tardifs en 1991 (Dhuin, 1993), alors que les temps à l'hectare ont moins diminué (-16 %).

Tableau E4 : Temps de travaux pour le fanage en 1990 et 1991

	temps / ha (h:min)		temps / balle (min)		temps / t MS (min)	
	1990	1991	1990	1991	1990	1991
Nb de chantiers	16	10	16	10	13	9
Moyenne	1:10	1:03	5.0	3.2	22.6	17.3
Ecart-type	0:40	0:22	5.0	1.4	13.3	7.0

Tableau E5 : Temps de travaux pour l'andainage en 1990 et 1991

	temps / ha (h:min)		temps / balle (min)		temps / t MS (min)	
	1990	1991	1990	1991	1990	1991
Nb de chantiers	21	38	21	38	18	30
Moyenne	1:39	1:23	7.0	4.5	32.9	22.1
Ecart-type	0:46	0:41	5.0	2.9	12.6	11.1

Epandage de mélasse et confection des balles enrubannées

En 1990, une cuve de pulvérisateur a permis de tester la technique d'épandage et de s'assurer du bon fonctionnement de la presse avec des andains ayant reçu de la mélasse ; les temps de travaux ont alors été estimés à 0:30 h ha⁻¹. En 1991, une cuve de 700 l (environ 1 tonne de mélasse) avec rampe d'épandage et commande d'ouverture depuis le tracteur a été construite par le C.I.R.A.D.. Les temps de travaux (tableau E6) mesurés alors avec ce matériel plus opérationnel se sont avérés supérieurs à la prévision 1990, notamment en raison du temps nécessaire au remplissage de la cuve (ce temps dépend de la viscosité de la mélasse et du dispositif de remplissage) et de la distance entre le lieu de remplissage et la parcelle. La vitesse d'avancement pour l'épandage (3 à 4 km h⁻¹) étant assez constante d'un chantier à l'autre, c'est le critère temps par hectare qui demeure le moins variable. La quantité de mélasse par tonne de MS est difficile à contrôler et à connaître, si ce n'est par une mesure à *posteriori*.

Les temps de pressage (tableau E7) sont doubles de ceux de la métropole (Gaillard *et al.*, 1989b) et supérieurs de 40 % à ceux enregistrés en Martinique (Royer *et al.*, 1992). Ils sont très variables et peuvent être très élevés notamment pour le kikuyu qui provoque des bourrages dans le pick-up lorsque le débit est trop élevé, ou qui se ramasse difficilement lorsque le rendement fourrager est faible. De plus, la libération de la balle après ficelage ne peut pas se faire en continu, notamment dans les Hauts de l'Ouest. La presse doit emmener la balle sur une position plate de la parcelle pour la relâcher sans risquer qu'elle ne roule dans la pente.

Les temps d'enrubannage (tableau E8) se sont peu améliorés d'une année à l'autre. Ils correspondent à un débit horaire d'environ 12 balles. En métropole et en Martinique, ce débit est double, soit 2 min 55 s par balle (Gaillard *et al.*, 1988, 1989b ; Royer *et al.*, 1992). Les mêmes machines ont été utilisées sur ces différents sites ; cependant, à La Réunion, compte tenu de la topographie difficile des parcelles, l'enrubanneuse doit souvent aller chercher les balles avant de les enrubanner sur un lieu de stockage accessible pour la reprise.

Tableau E6 : Temps de travaux pour l'épandage de mélasse en 1990 et 1991

	temps / ha (h:min)		temps / balle (min)		temps / t MS (min)	
	1990	1991	1990	1991	1990	1991
Nb de chantiers	21	38	21	38	18	30
Moyenne	0:31	1:19	2.0	4.0	10.3	23.2
Ecart-type	0:03	0:30	1.0	1.7	3.1	11.1

Tableau E7 : Temps de travaux pour le pressage en 1990 et 1991

	temps / ha (h:min)		temps / balle (min)		temps / t MS (min)	
	1990	1991	1990	1991	1990	1991
Nb de chantiers	21	38	21	38	18	30
Moyenne	2:14	2:08	9.0	6.4	45.1	36.7
Ecart-type	1:09	0:54	4.0	3.4	15.3	17.6

Tableau E8 : Temps de travaux pour l'enrubannage en 1990 et 1991

	temps / ha (h:min)		temps / balle (min)		temps / t MS (min)	
	1990	1991	1990	1991	1990	1991
Nb de chantiers	21	38	21	38	18	30
Moyenne	1:31	1:48	6.0	5.2	31.7	30.3
Ecart-type	0:51	0:42	2.0	2.0	10.1	14.2

Manutention, transport et stockage des balles enrubannées

Cette opération est réalisée avec un chargeur frontal (Mailleux ou Fauchaux), équipé si nécessaire d'une pince pour balles (Manubal 120), un plateau complète l'équipement lorsqu'il y a transport. Plusieurs organisations de chantier sont possibles : soit les balles sont transportées puis stockées à la ferme, soit les balles sont enrubannées et stockées en bordure de parcelle avec approvisionnement ou non de l'enrubanneuse. Si le transport est effectué après l'enrubannage, il est nécessaire d'utiliser une pince spéciale qui n'endommage pas le film. Néanmoins, cette dernière possibilité s'est avérée peu opérationnelle, car beaucoup de précautions sont à prendre, ce qui ralentit le chantier. En 1991, le transport a donc été abandonné, l'éleveur ayant à sa charge le travail de reprise des balles sur la parcelle au fur et à mesure du besoin de ses animaux. En 1990, la manutention allait de pair avec le transport, par contre peu de manutention concernait l'approvisionnement de l'enrubanneuse. En 1991, la manutention a concerné presque exclusivement l'approvisionnement de l'enrubanneuse. Le transport, opéré sur quelques chantiers en 1990 dépend entre autre de la distance entre la parcelle et la ferme et des conditions d'accès à ces lieux, parfois très difficiles (chemins mal entretenus).

Tableau E9 : Temps de travaux pour la manutention et le transport en 1990 et 1991

	temps / ha (h:min)		temps / balle (min)		temps / t MS (min)	
	1990	1991	1990	1991	1990	1991
Nb de chantiers	11	17	11	17	10	14
Moyenne	2:35	2:09	9.0	7.1	49.0	38.6
Ecart-type	1:06	1:35	8.0	8.2	28.5	31.8

Résultats par région

En 1990, 4 régions d'élevage ont été concernées par l'ensilage en balles enrubannées. Par contre, en 1991, par manque de disponibilité en matériel, la région Hauts du Sud n'a pas réalisé de balles enrubannées. Ce paragraphe traite de l'évolution des temps de travaux, région par région, pour chaque opération de récolte. Cette présentation donne un aperçu des contraintes propres à chacune des régions, et du potentiel d'amélioration de la technique ou de levée des blocages techniques ou organisationnels.

La région Plaine des Palmistes (tableau E10) présente des performances intéressantes. Les estimations du début d'année 1992 (Lepetit, 1992a) montrent une stabilité des temps de travaux (environ 20 min par balle). Pour la Plaine des Cafres (tableau E11), les temps par tonne de MS ont été divisés par deux entre 1990 et 1991 où la suppression du transport a permis d'améliorer l'efficacité des chantiers. Les données recueillies début 1992 (Lepetit, 1992a) font état d'une quasi stabilité des temps par balle (27.4 en 1991 et 30 en 1992). Mis à part pour la fauche (changement de machine) et dans une moindre mesure pour le pressage, on ne note pas d'amélioration importante des performances de chantiers des Hauts de l'Ouest entre 1990 et 1991 (tableau E12). Les temps de travaux de la région Hauts du Sud (tableau E13) sont difficiles à analyser car aucune balle n'a été réalisée en 1991. Néanmoins, les performances enregistrées s'apparentent à celles de la Plaine des Palmistes. En effet, la région de Grand Coude se prête plutôt bien à la récolte des fourrages avec des parcelles assez grandes et peu pentues.

Tableau E10 : Moyennes des temps de travaux pour la Plaine des Palmistes en 1990 et 1991

Opérations de récolte	temps / ha (h:min)		temps / balle (min)		temps / t MS (min)	
	1990	1991	1990	1991	1990	1991
Fauche	2:51	1:15	16.0	4.0	65.0	18.2
Fanage	0:26		2.0		10.0	
Andainage	1:22	0:44	8.0	3.0	31.0	10.7
Epandage de mélasse	0:31	0:53	3.0	3.0	12.0	12.9
Pressage	1:36	1:09	9.0	4.0	37.0	16.8
Enrubannage	1:00	1:19	5.0	5.0	23.0	19.2
Manutention et transport		0:34		2.0		8.3
TOTAL	7:48	5:54	45.0	21.0	179.0	86.1

Annexe E

Tableau E11 : Moyennes des temps de travaux pour la Plaine des Cafres en 1990 et 1991

Opérations de récolte	temps / ha (h:min)		temps / balle (min)		temps / t MS (min)	
	1990	1991	1990	1991	1990	1991
Fauche	3:09	1:42	13.0	4.3	54.0	24.3
Fanage	1:51	0:56	7.0	3.1	32.0	13.3
Andainage	2:15	0:59	9.0	2.8	39.0	14.0
Epandage de mélasse	0:32	0:59	2.0	2.5	9.0	14.0
Pressage	2:40	1:35	11.0	4.0	46.0	22.6
Enrubannage	1:55	1:37	8.0	4.1	33.0	23.1
Manutention et transport	3:32	2:27	13.0	6.5	61.0	35.0
TOTAL	15:57	10:15	65.0	27.4	275.0	146.4

Tableau E12 : Moyennes des temps de travaux pour les Hauts de l'Ouest en 1990 et 1991

	temps / ha (h:min)		temps / balle (min)		temps / t MS (min)	
	1990	1991	1990	1991	1990	1991
Fauche	4:18	2:22	12.0	6.5	68.0	42.7
Fanage	1:13	1:00	3.0	2.8	19.0	18.0
Andainage	1:39	1:28	4.0	4.0	26.0	26.4
Epandage de mélasse	0:31	1:17	1.0	4.0	8.0	23.1
Pressage	3:21	2:24	9.0	7.3	53.0	43.3
Enrubannage	2:14	2:03	6.0	5.7	35.0	37.0
Manutention et transport	2:10	2:15	5.0	6.1	34.0	40.6
TOTAL	15:28	12:49	44.0	36.6	245.0	231.1

Tableau E13 : Moyennes des temps de travaux pour les Hauts du Sud en 1990

Opérations de récolte	temps / ha (h:min)	temps / balle (min)	temps / t MS (min)
Fauche	2:14	11.0	56.0
Fanage	1:04	5.0	27.0
Andainage	1:42	8.0	42.0
Epandage de mélasse	0:29	2.0	12.0
Pressage	1:35	8.0	40.0
Enrubannage	1:04	5.0	27.0
TOTAL	8:10	41.0	204.0

Coût de la production fourragère

La production fourragère a été évaluée au même coût pour toutes les régions (tableau E14), de manière à ne pas introduire de biais par rapport à l'évaluation de la technique de récolte qui nous intéresse ; ce coût moyen mériterait cependant d'être affiné pour chacune des régions ou situations particulières. Les coûts fixes correspondent à l'investissement réalisé pour constituer une exploitation d'élevage, ils sont donc supportés par l'éleveur quel que soit le système d'alimentation envisagé. Les coûts variables correspondent par contre au coût direct que nécessite la production d'herbe sur une prairie.

Tableau E14 : Calcul d'un coût moyen pour la production fourragère

nature	éléments du coût	quantité	prix unitaires (F)	coûts fixes (F)	coûts variables (F)
Intrants	chaux (t)	1.5	2 000	3 000	
	semences (kg)	40	30	1 200	
	phyto (kg)	40	26	1 040	
	désherbage (l)	10	125	1 250	
	engrais (t)	0.5	2 000	1 000	
Travaux	main d'oeuvre (h)	7	50	350	
pour	coût fixe tracteur (h)	7	48	336	
installation	coût variable tracteur (h)	7	54	378	
de prairie	entreprise (h)	5	250	1 250	
Clôture				1 350	
Total du coût de création pour 5 ans				11 154	
Coût de création par hectare et par an				2 231	
Intrants	chaux (t)	0.5	2 000		1 000
	désherbage				500
	engrais (t)	1	2 000		2 000
Epandage	main d'oeuvre (h)	4	50	200	
d'engrais	coût fixe tracteur (h)	4	48	192	
	coût variable tracteur (h)	4	54		216
Epandage du lisier	main d'oeuvre (h)	15	50	750	
	coût fixe tracteur (h)	15	48	720	
	coût variable tracteur (h)	15	54		810
	location citerne (par ha)	1	50	50	
Coût d'entretien par hectare et par an				1 912	4 526
Coût total de production d'herbe par hectare et par an				4 143	4 526
Coût par tonne de MS produite (10 t MS ha⁻¹)				414	453

(Source : Union des A.F.P., E.D.E., S.U.A.D. - Machinisme, C.I.R.A.D.)

Coût des intrants

Film étirable et ficelle de liage (tableau E15)

La consommation théorique de film étirable est de 750 g par balle (850 g par balle mesuré), pour un taux d'étirage de 55 % (taux pratiqué sur l'enrubanneuse Silawrap 7510), avec un film de 500 mm de largeur et pour des balles de Ø1.20 m x 1.20 m (Gaillard, 1988). La ficelle utilisée en 1990 était de moins bonne qualité que celle achetée en 1991 et provenait d'un stock existant à la S.I.C.A. - Lait. En 1991, le prix de la ficelle a triplé. Pour l'approche du coût des balles enrubannées, un forfait de 30 F par balle pour le film et la ficelle, facturé par l'Union des A.F.P. aux éleveurs, a été retenu. Ce coût ramené à la tonne de MS devient donc variable selon la différence de densité des balles constatée pour chaque région.

Tableau E15 : Consommations et coûts du film étirable et de la ficelle en 1990 et 1991

	quantité par balle		coût par balle (F)	
	1990	1991	1990	1991
film étirable	864 g	880 g	25.00	25.50
ficelle	100 m	115 m	1.00	3.78
total			26.00	29.28

Apports de mélasse

Les quantités de mélasse utilisées ont été mesurées à posteriori (tableau E16). Du fait des plus grands chantiers, il semble que la régularité d'épandage par rapport à la surface soit meilleure en 1991. Par contre, la régularité par rapport à la masse de produit récolté, critère qui nous intéresse le plus, a été moins bonne en 1991. Les rendements fourragers ont été en moyenne supérieurs en 1991, et il a été plus difficile de maîtriser la quantité de mélasse épandue.

Les apports de sucres solubles sont importants et dépassent largement les recommandations moyennes : 60, 80, 100 g kg⁻¹ MS pour le ray-grass, le dactyle et le kikuyu, respectivement (Lepetit *et al.*, 1992). De 1990 à 1991, la région Plaine des Palmistes a réduit les apports pour tenir compte d'un fourrage plus riche en glucides solubles (ray-grass, dactyle, féтуque). La région Plaine des Cafres est restée stable, pourtant les apports pourraient être diminués. Les Hauts de l'Ouest ont augmenté les apports, en liaison avec le fourrage ensilé : essentiellement du kikuyu en 1991.

Un effort d'adaptation des quantités de mélasse à épandre, au rendement fourrager estimé et à l'espèce fourragère récoltée, devrait être fait. Les recommandations proposées (Lepetit, 1992a) sont indicatives, mais ne semblent pas suffisantes. En effet, les apports extrêmes de sucres solubles vont de 58 à 219 g kg⁻¹ MS en 1990, et de 40 à 248 g kg⁻¹ MS en 1991. En 1994, des abaques d'épandage (annexe B - pp 43-44) intégrant, la dose de sucres solubles nécessaire, la vitesse moyenne d'écoulement de la mélasse et la vitesse d'avancement du tracteur, sont proposées pour mieux contrôler l'apport de sucres solubles.

Tableau E16 : Epandages de mélasse sur andains par région en 1990 et 1991

régions		Quantités épandues en 1990		Quantités épandues en 1991	
		(l ha ⁻¹)	(l t ⁻¹ MS)	(l ha ⁻¹)	(l t ⁻¹ MS)
Plaine des	moyenne	494	185	583	141
Palmistes	écart-type	283	75	182	46
Plaine des	moyenne	520	174	586	149
Cafres	écart-type	385	82	319	113
Hauts de	moyenne	703	194	730	216
l'Ouest	écart-type	257	67	196	68
Hauts du	moyenne	552	233		
Sud	écart-type	209	66		
ensemble	moyenne	563	190	650	175
des	écart-type	287	60	224	77
régions	CV	51 %	32 %	34 %	44 %

Les coûts suivent ces différentes consommations en mélasse. Pour l'analyse du coût du stock fourrager, le coût de la mélasse est estimé dans des conditions moyennes modélisées selon le type de fourrage présent le plus fréquemment dans chacune des régions (tableau E17).

Tableau E17 : Simulation de l'apport de mélasse selon les régions

	Plaine des Palmistes	Hauts de St Joseph	Plaine des Cafres	Hauts de l'Ouest
Composition floristique habituellement rencontrée	dactyle 1/3, féтуque 1/3, ray-grass 1/3	ray-grass 2/3, dactyle 1/3	ray-grass 1/3, dactyle 1/3, kikuyu 1/3	kikuyu 2/3, dactyle 1/3
GS du fourrage (g kg ⁻¹ MS)	40	50	40	20
RF moyen 90-91 (t MS ha ⁻¹)	3.5	3.0	4.0	3.5
teneur en MS moyenne 90-91(%)	35	30	30	25
Apport de SS (kg ha ⁻¹)	250	225	350	450
Apport de mélasse (kg ha ⁻¹ / l ha ⁻¹)	500 / 350	450 / 320	700 / 500	900 / 650
Apport de mélasse (kg t ⁻¹ MS)	140	150	175	250
Coût (F par tonne de MS)	120	130	150	215

SS = sucres solubles ; RF = rendement fourrager

Coût de la récolte

Plus l'éleveur investit dans la réalisation des chantiers d'ensilage, plus ses coûts directs diminuent au profit des coûts fixes (tableau E18). Globalement, le coût cumulé a tendance à diminuer. En effet, les charges d'entreprise comprennent les coûts de main d'oeuvre, y compris les heures improductives, et un amortissement du capital plus contraignant que lorsque l'éleveur amortit lui-même son matériel sur l'ensemble des activités de l'exploitation.

Tableau E18 : Simulation des coûts de récolte selon l'organisation de chantier et les régions

régions	coûts (F t ⁻¹ MS)	organisation 1	organisation 2	organisation 3	organisation 4
Plaine des	coûts fixes	0	36	85	147
Palmistes	coûts variables	582	510	412	263
Hauts du	coûts fixes	0	11	137	204
Sud	coûts variables	721	698	446	313
Plaine des	coûts fixes	0	82	168	245
Cafres	coûts variables	867	703	530	335
Hauts de	coûts fixes	0	100	235	359
l'Ouest	coûts variables	1167	967	696	448

Coût global du stock fourrager réalisé en balles enrubannées

A partir des différents éléments du coût (production fourragère, intrants, mécanisation et main d'oeuvre) et en différenciant les coûts selon leur nature fixe ou variable, nous pouvons présenter plusieurs graphiques (figures E2, E3, E4 et E5) pour chacune des régions en retenant le mode d'organisation des chantiers comme élément de variation. Sur ces graphiques, les organisations en caractères gras correspondent aux organisations de travail les plus fréquemment rencontrées.

Pour toutes les régions, le travail par entreprise est une sortie d'argent d'autant plus importante que les temps de travaux sont élevés (Hauts de l'Ouest). L'organisation du travail en entraide permet un transfert des coûts variables vers des coûts fixes, avec une diminution globale des coûts totaux. Plus les coûts sont élevés, plus la réduction des coûts variables est importante lorsque l'éleveur peut participer aux travaux.

Pour l'exploitation agricole, la main d'oeuvre fait partie de l'exploitation, c'est sa disponibilité, non estimable au niveau des coûts variables, qui est à prendre en compte.

L'incidence des intrants varie légèrement d'une région à l'autre lorsqu'on tient compte du type de fourrage à ensiler et du poids en MS des balles. La consommation d'intrants est donc plus forte dans les Hauts de l'Ouest.

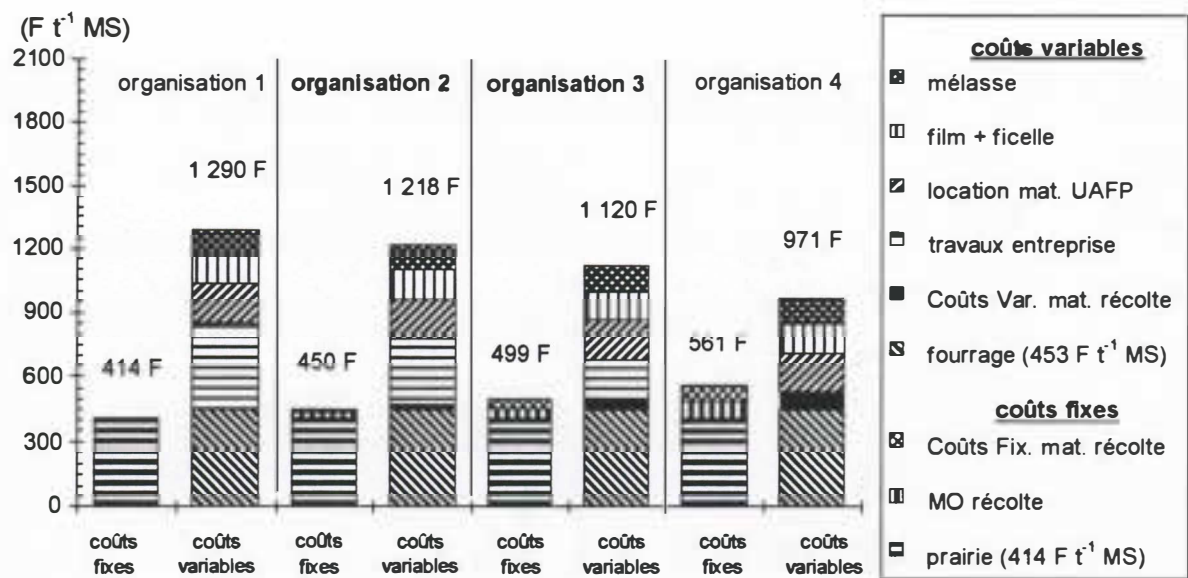


Figure E2 : Simulation du coût du stock fourrager pour la Plaine des Palmistes

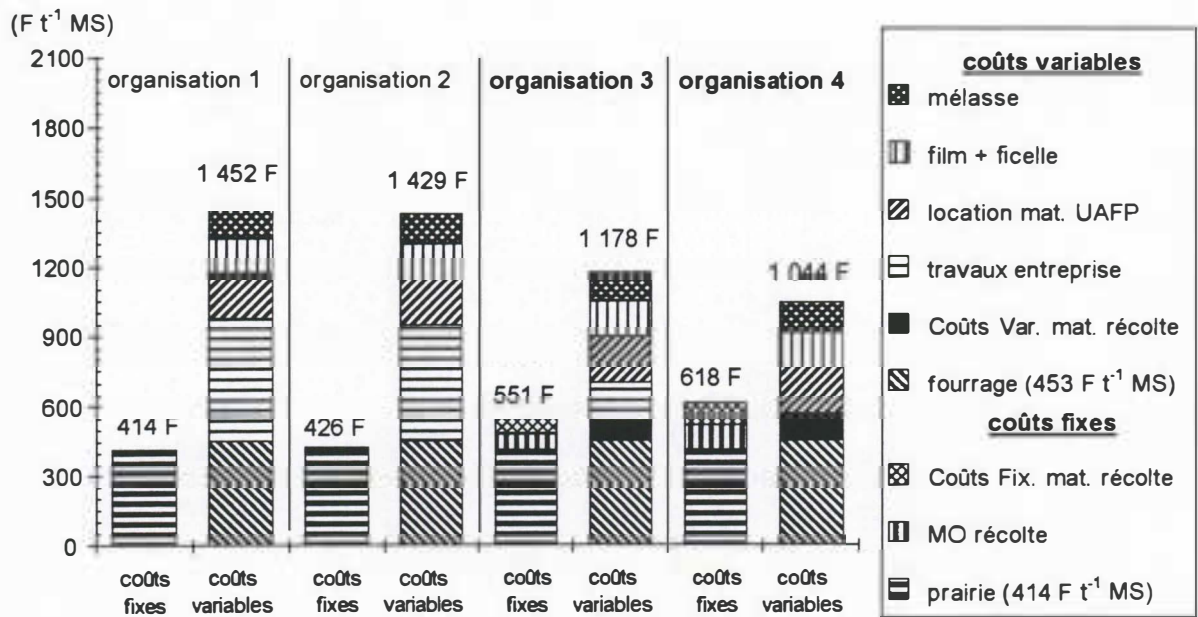


Figure E3 : Simulation du coût du stock fourrager pour les Hauts du Sud

Annexe E

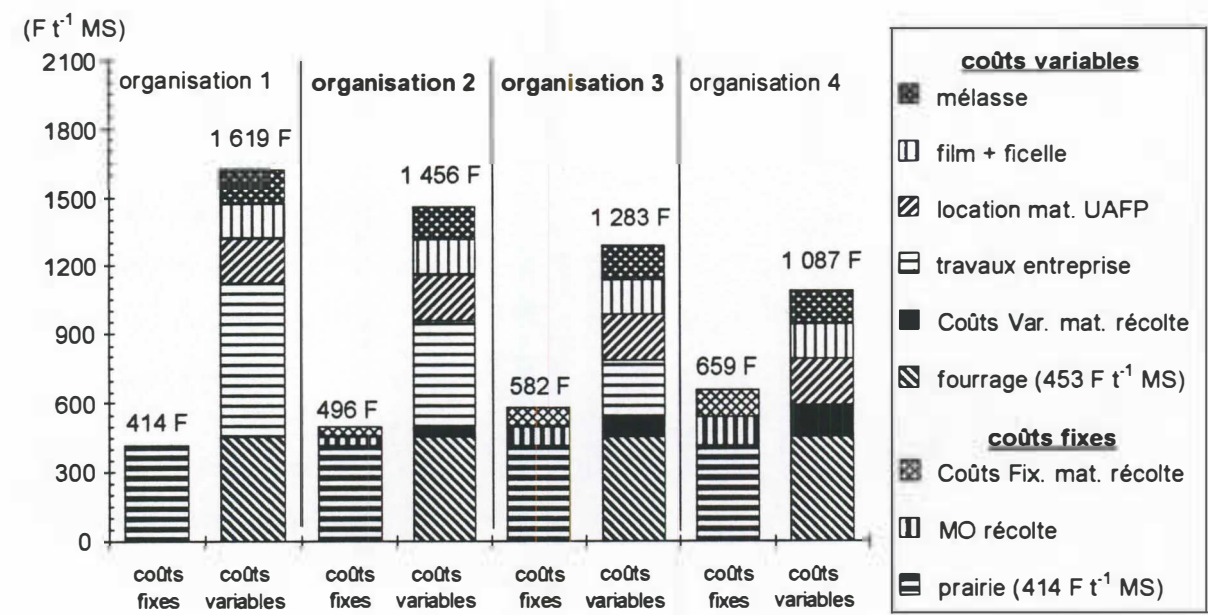


Figure E4 : Simulation du coût du stock fourrager pour la Plaine des Cafres

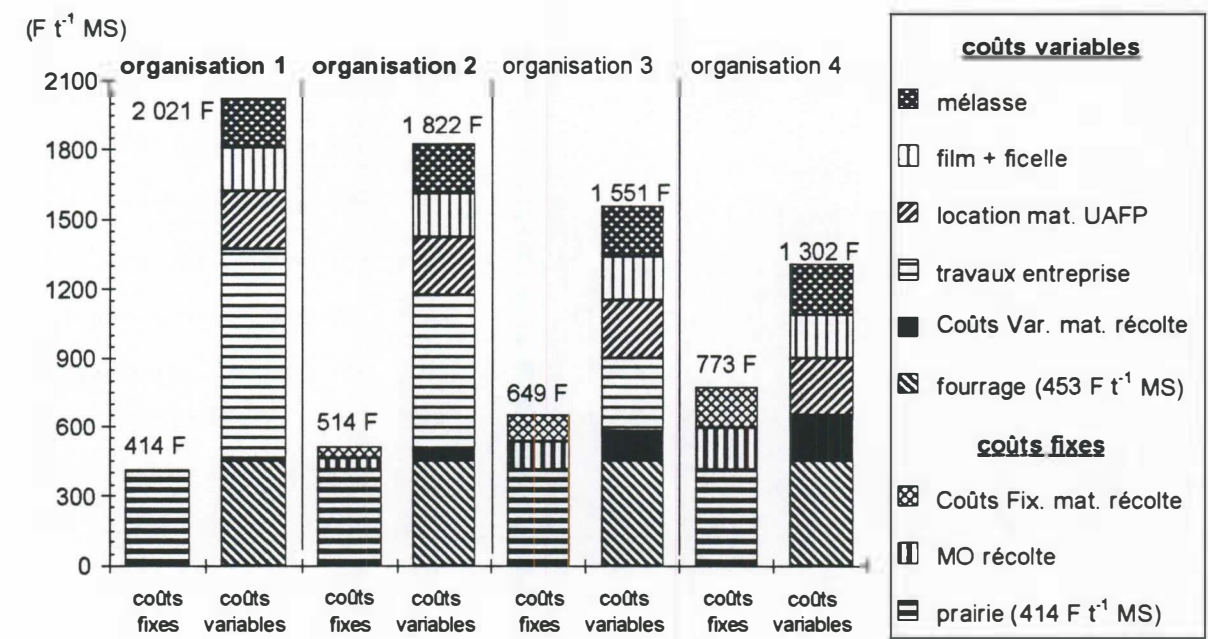


Figure E5 : Simulation du coût du stock fourrager pour les Hauts de l'Ouest

Rentabilité du matériel acquis par l'Union des A.F.P.

Le critère retenu pour la facturation aux éleveurs et à l'entrepreneur de travaux, prestataire pour l'Union des A.F.P., est la balle enrubannée. La facture à l'éleveur comprend les intrants fournis (film et ficelle), les réparations et la location du matériel de récolte (faucheuse, andaineur, cuve, presse, enrubanneuse). Les prestations de traction effectuées sont directement facturées par l'entrepreneur à l'éleveur, sur la base d'un coût horaire fixé en début de campagne par accord entre l'association et l'entrepreneur.

Deux conditions d'amortissement sont possibles en fonction de l'activité (tableau E19) : un amortissement lent avec une dépréciation faible lorsque l'activité est centrée autour de 1000 balles par an (Hauts de l'Ouest et du Sud), et un amortissement rapide avec une dépréciation forte lorsque l'activité atteint ou dépasse les 2000 balles par an (Plaines des Cafres et des Palmistes). Les coûts fixes sont calculés par la méthode de l'I.G.E.R. et du B.C.M.E.A. (Fiévet, 1982). les frais financiers sont calculés pour un emprunt de 25 % de la valeur d'achat du matériel, les 75 % restant sont couverts par la subvention de la Région Réunion. Les coûts variables (réparations) sont évalués suite à l'expérience des deux années de suivi du matériel (Lepetit, 1992a).

Tableau E19 : Conditions d'amortissement et de dépréciation du matériel acheté par l'Union des A.F.P. (méthode I.G.E.R. - B.C.M.E.A.)

matériel utilisé	valeur d'achat (VA) (F 1992)	durée amortissement (an)	taux de dépréciation (%)	activité (balles / an)	activité totale (balles)	taux de réparation (% VA h ⁻¹)
Amortissement rapide et dépréciation forte (base de 2000 balles / an)						
faucheuse	50000	5	25	2000	10000	0.13
andaineur	30000	7	20	2000	14000	0.09
cuve	7000	10	10	2000	20000	0.04
presse	115000	5	25	2000	10000	0.06
enrubanneuse	90000	7	20	2000	14000	0.04
Amortissement lent et dépréciation faible (base de 1000 balles / an)						
faucheuse	50000	7	20	1000	7000	0.13
andaineur	30000	10	15	1000	10000	0.09
cuve	7000	10	10	1000	10000	0.04
presse	115000	7	20	1000	7000	0.06
enrubanneuse	90000	10	15	1000	10000	0.04

Annexe E

Les matériels ont été différenciés en deux groupes (figure E6) pour mettre en évidence les différents choix possibles (selon les organisations des chantiers mises en oeuvre).

Les intrants représentent 30 F par balle et les coûts de réparation 20 F par balle (9 F pour faucheuse, andaineur et cuve à mélasse, et 11 F pour presse et enrubanneuse), les coûts fixes, dépendant de l'activité, représentent le reste.

La facturation à 70 F par balle (prix pratiqué en 1991) exigerait une activité annuelle d'environ 2200 balles pour atteindre l'équilibre (figure E6), ce qui est élevé et tend à pénaliser la qualité du travail et l'organisation des chantiers par manque de disponibilité du matériel ; en 1992, 2400 balles ont été réalisées par le matériel présent sur la zone des Plaines, avec de nombreux problèmes d'organisation (Lepetit, 1992a).

Suite à l'expérience menée depuis 1990, il apparaît que l'activité, permettant à la fois de rentabiliser le matériel et d'assurer un travail de qualité pour les éleveurs, devrait se situer entre 1200 et 1800 balles par an, soit respectivement 78 F par balle en amortissement lent et 74 F par balle en amortissement rapide (figure E6). En-deçà, le coût supérieur (84 F par balle pour une activité de 1000 balles par an) peut être absorbé grâce à la subvention d'équipement obtenue, en supposant que celle-ci soit renouvelable, au moins pour partie, lors de l'achat du matériel de remplacement, ce qui est en principe le cas. Ceci est valable également pour compenser le manque à gagner entre la facturation de 70 F par balle et le prix d'équilibre (74 à 78 F par balle).

Dans le cas où les éleveurs gèreraient eux-mêmes le matériel de fauche, d'andainage et d'épandage de mélasse, le prix d'équilibre pourrait se situer entre 58 et 62 F par balle pour 1200 à 1800 balles par an.

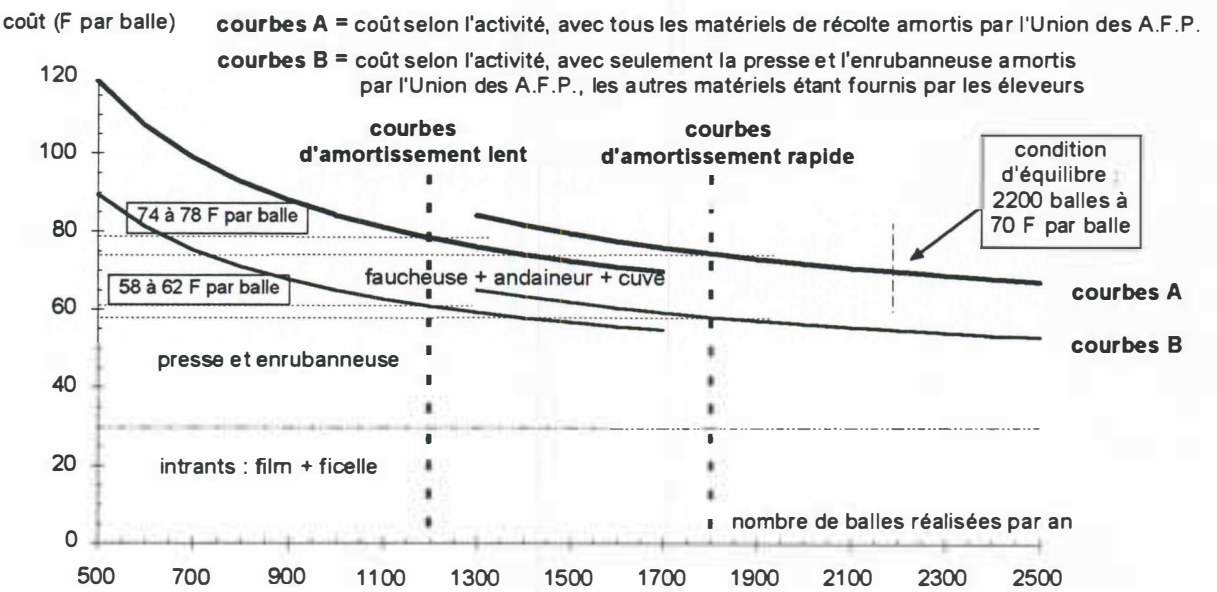


Figure E6 : Simulation du coût pour l'Union des A.F.P., selon le nombre de balles enrubannées réalisées annuellement et les conditions d'amortissement correspondantes

Analyses des facteurs explicatifs du coût

Matrice des corrélations

Tableau E20 : Corrélations entre les conditions de récolte et le coût

	Date	Stade	Condit. météo	Difficult. méca.	Surface	Esp. temp.	Teneur en MS	Rend. four.	Coût par t. MS
Date	1.00								
Stade	-0.17	1.00							
Cond. météo	-0.18	0.27	1.00						
Diff. méca.	-0.32	0.54	0.14	1.00					
Surface	-0.02	-0.20	-0.04	-0.31	1.00				
Esp. temp.	0.24	-0.49	-0.02	-0.57	0.07	1.00			
Teneur en MS	0.09	-0.36	-0.52	-0.44	0.01	0.16	1.00		
Rend. four.	0.02	-0.02	-0.03	0.02	-0.01	0.26	-0.07	1.00	
Coût par t. MS	-0.42	0.43	0.35	0.64	-0.38	-0.47	-0.43	-0.42	1.00

les chiffres en caractères gras sont les coefficients de corrélation r compris entre 0.45 et 1

Analyse en composantes principales

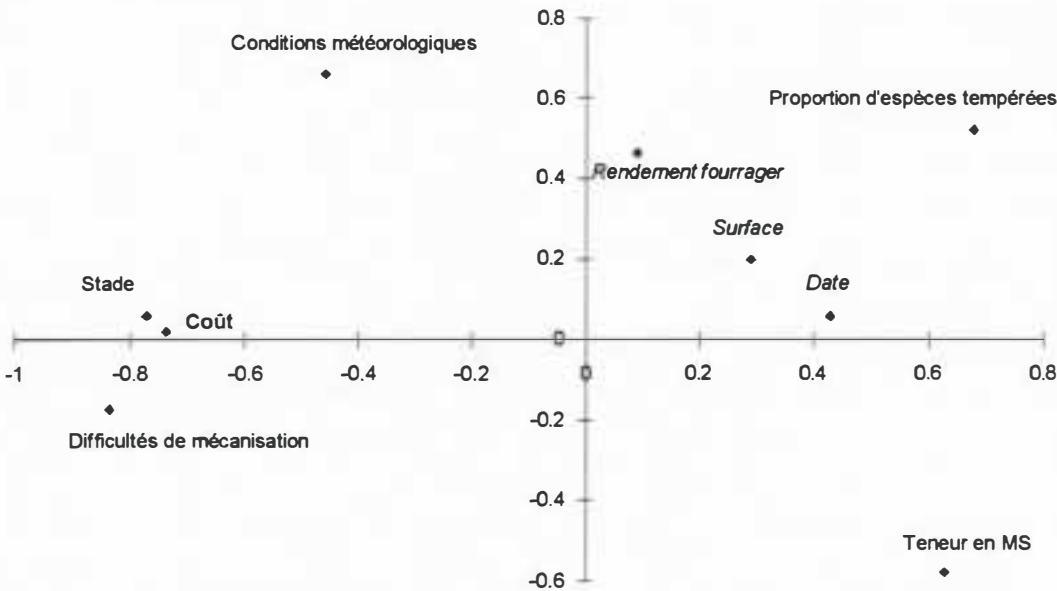


Figure E7 : Représentation des conditions de chantier en 1990 et 1991 (ACP)

Caractéristiques des chantiers selon les régions

Tableau E21 : Analyse univariée pour les Hauts de l'Ouest en 1990 et 1991

Variables	Moyenne	ET	Minimum	Q1	Médiane	Q3	Maximum
			0%	25%	50%	75%	100%
Date (mois moyen de 1 à 8)	3.8	1.0	2	3.5	4	4.5	5
Stade (1 à 5)	2.9	1.7	1	1	2.5	4.5	5
Conditions météo. (1 à 4)	2.3	1.0	1	1.5	2	3	4
Difficultés de mécan. (1 à 4)	3.1	0.5	2	3	3	3	4
Surface (ha)	1.2	0.7	0.4	0.8	1.0	1.4	4.0
Proportion d'esp. temp. (%)	26	35	0	0	0	65	80
teneur en MS (%)	25	7	16	20	24	31	42
Rend. fourrager (t MS ha ⁻¹)	3.4	0.5	2.7	3.1	3.5	3.7	4.4
Coût 1990 - 1991 (F t ⁻¹ MS)	1332	217	1046	1156	1270	1525	1704

ET = écart-type ; Q1 = premier quartile ; Q3 = dernier quartile

Tableau E22 : Analyse univariée pour la Plaine des Cafres en 1990 et 1991

Variables	Moyenne	ET	Minimum	Q1	Médiane	Q3	Maximum
			0%	25%	50%	75%	100%
Date (mois moyen de 1 à 8)	4.2	1.5	3	3	3	6	6
Stade (1 à 5)	1.7	0.9	1	1	1	2	3
Conditions météo. (1 à 4)	2.0	1.0	1	1	2	2	4
Difficultés de mécan. (1 à 4)	2.2	0.8	1	2	2	3	3
Surface (ha)	0.8	0.1	0.4	0.6	0.7	0.8	1.1
Proportion d'esp. temp. (%)	83	33	20	100	100	100	100
teneur en MS (%)	34	13	17	24	29	45	57
Rend. fourrager (t MS ha ⁻¹)	4.5	1.5	2.8	3.2	4.7	5.4	6.9
Coût 1990 - 1991 (F t ⁻¹ MS)	1088	186	795	975	1157	1244	1330

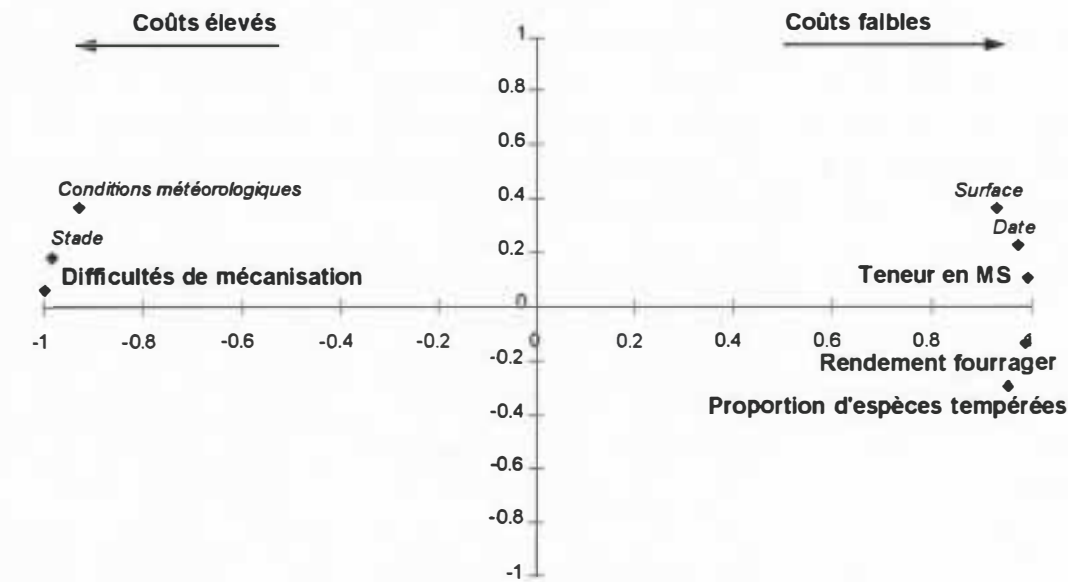
ET = écart-type ; Q1 = premier quartile ; Q3 = dernier quartile

Tableau E23 : Analyse univariée pour la Plaine des Palmistes en 1990 et 1991

Variables	Moyenne	ET	Minimum	Q1	Médiane	Q3	Maximum
			0%	25%	50%	75%	100%
Date (mois moyen de 1 à 8)	5.9	2.2	1	6	6.5	7	8
Stade (1 à 5)	1.3	0.8	1	1	1	1	4
Conditions météo. (1 à 4)	2.0	1	1	1	2	3	4
Difficultés de mécan. (1 à 4)	1.6	0.5	1	1	2	2	2
Surface (ha)	1.6	0.9	0.4	0.6	1.5	2.0	4.0
Proportion d'esp. temp. (%)	65	30	0	50	75	90	100
teneur en MS (%)	36	9	24	30	34	44	54
Rend. fourrager (kg MS ha ⁻¹)	3.6	0.9	2.1	3.2	3.5	4.1	5.2
Coût 1990 - 1991 (F t ⁻¹ MS)	910	250	634	700	877	1065	1365

ET = écart-type ; Q1 = premier quartile ; Q3 = dernier quartile

Analyse factorielle discriminante



variables significativement discriminantes en caractères gras

Figure E8 : Représentation des conditions de chantier discriminantes du coût d'ensilage pour 1990 et 1991 (AFD)

Coût des ensilages réalisés avec d'autres techniques

Depuis 1987, quelques suivis de chantiers d'ensilages en silos, beaucoup moins nombreux que pour les balles enrubannées, ont permis de cerner les temps de travaux et d'estimer les coûts. La variabilité des coûts n'ayant pu être appréhendée, la comparaison avec la technique des balles enrubannées ne peut être qu'indicative dans certaines conditions.

Récolteuse hacheuse et chargeuse à fléaux

Pour les 4 chantiers suivis en 1987 dans les Hauts de l'Ouest (Paillat, 1987), les coûts de mécanisation (méthode I.G.E.R. et B.C.M.E.A.) et d'intrants ont été calculés (tableau E24) ; la quantité d'ensilage a été évaluée après cubage des silos et estimation de la densité (700 kg m^{-3}). Pour les 2 chantiers suivis en 1988 dans cette même région (Paillat *et al.*, 1988), les temps de travaux ont été relevés, ainsi que le poids de chaque benne (pèse-essieux) avec mesure de la teneur en MS (étuve) ; les coûts de mécanisation ont été calculés à partir des factures établies par l'entreprise de travaux (200 F par heure de tracteur avec chauffeur). L'organisation des chantiers avec cette machine est la suivante :

- un tracteur (85 ch) récolte avec l'ensileuse à fléaux (largeur de coupe = 1.30 m), portée latéralement, la benne est accrochée sur le bâti de la récolteuse,
- après décrochage, un second tracteur reprend la benne pleine pour l'acheminer au silo,
- le tracteur qui récolte accroche alors une seconde benne,
- au silo, un 3^{ème} tracteur (125 ch) tasse et épand la mélasse (cuve munie d'une rampe).

En 1987, les temps de travaux ont varié de 5.1 h ha^{-1} à 11.3 h ha^{-1} (conditions de parcellaire et de pente très difficiles). En 1988, le chantier réalisé en coupe directe a nécessité 5.7 h ha^{-1} , alors que la parcelle récoltée après un ressuyage n'a demandé que 3.5 h ha^{-1} (résultat non extrapolable vu la taille de la parcelle et les conditions particulières). Les références métropolitaines pour ce type de machines manquent actuellement, car celles-ci ont été remplacées par les ensileuses à couteaux (Gaillard, 1987).

Tableau E24 : Chantiers d'ensilage réalisés avec une récolteuse hacheuse et chargeuse à fléaux dans les Hauts de l'Ouest

chantiers (n=6)	surface (ha)	teneur en MS (%)	quantité de MS (t)			coût (F)		
			total	par ha	par benne	total	par ha	par t MS
somme	14.41		41.9			63693		
moyenne pondérée		19		2.9	0.27		4432	1524

Récolteuse hacheuse et chargeuse à double coupe

Cette ensileuse est peu utilisée actuellement en métropole. Elle est constituée d'un rotor à fléaux assurant la fauche, d'une vis d'alimentation et d'un volant hacheur à couteaux. Elle a été adoptée jusqu'en 1990 par l'Union des A.F.P. (Taarup DC1500 d'une largeur de fauche de 1.50 m) et par la C.U.M.A. des Plaines (New-Holland d'une largeur de fauche de 2 m). Mal adapté à la reprise d'andains, ce matériel n'a travaillé qu'en coupe directe.

Un seul chantier a été suivi complètement, c'est à dire avec enregistrement des temps de travaux, pesée des bennes (pèse-essieux) et détermination de la teneur en MS (étuve) à chaque benne, en 1988, dans les Hauts du Sud (Grand-Coude). Cependant, une analyse rétrospective (Lepetit, 1992b) d'une année de fonctionnement de la C.U.M.A. des Plaines durant la période 1989-1992, a pu être réalisée ; la précision des temps de travaux est par contre déficiente par absence d'enregistrements. Le calcul des coûts (tableau E25) a également été réalisé avec la méthode I.G.E.R. et B.C.M.E.A..

Le débit de ces machines étant supérieur à celui de la récolteuse à fléaux, il est nécessaire de prévoir davantage de bennes. L'organisation de chantier est la suivante :

- un tracteur avec l'ensileuse double-coupe (80 à 90 ch pour la coupe de 1.50 m et 100 à 120 ch pour la coupe de 2 m),
- 2 à 3 tracteurs avec bennes suivent l'ensileuse en parallèle, selon la distance de la parcelle au silo et selon la taille des bennes,
- un tracteur avec chargeur frontal au silo pour étaler le fourrage, tasser et éventuellement mettre la mélasse si une cuve avec rampe est disponible.

Pour les Hauts du Sud, avec une machine de 1.50 m de coupe, les temps de travaux mesurés ont été de 1.8 h ha^{-1} . Pour la Plaine des Cafres et la Plaine des Palmistes, avec une machine de 2 m de coupe, la C.U.M.A. des Plaines a estimé les temps de travaux en moyenne à 1.5 h ha^{-1} (de 1 h ha^{-1} à 2.25 h ha^{-1}).

Tableau E25 : Chantiers d'ensilage réalisés avec une récolteuse hacheuse et chargeuse à double coupe (largeur 1.50 m) dans les Hauts du Sud et rétrospective annuelle de l'activité d'ensilage avec cette machine (largeur 2 m) pour la C.U.M.A. des Plaines

chantiers	surface (ha)	teneur en MS (%)	quantité de MS (t)			coût (F)		
			total	par ha	par benne	total	par ha	par t MS
<u>Hauts du Sud</u>	1.6	15	3.5	2.1	0.35	5495	3402	1588
<u>Plaine des Cafres et Plaine des Palmistes</u>								
somme	177		554.4			380040		
moyenne pondérée		17		3.1	0.69		2147	685

Récolteuse hacheuse et chargeuse à couteaux

Ce matériel de conception plus récente, utilisé en métropole depuis le début des années 70, a seulement été introduit à La Réunion en 1992. Après reprise d'un andain ressuyé grâce à un pick-up, un tambour ou un volant munis de couteaux hache finement le fourrage.

En 1992 et 1993, 8 chantiers réalisés par la C.U.M.A. des Plaines ont été suivis avec enregistrements des temps de travaux, pesée des bennes (pèse-essieux) et détermination de la teneur en MS (four à micro-ondes) à chaque benne. Le calcul des coûts (tableau E26) a été réalisé avec la méthode de l'I.G.E.R. et du B.C.M.E.A..

Annexe E

L'organisation des chantiers avec ce matériel est la suivante :

- fauche la veille ou quelques heures avant récolte avec une faucheuse conditionneuse Kuhn FC250 d'une largeur de travail de 2.50 m, avec un tracteur de 60 à 90 ch,
- regroupement ou retournement des andains si nécessaire,
- épandage de mélasse sur l'andain avec une cuve portée munie d'une rampe,
- reprise des andains avec l'ensileuse à couteaux (tracteur de 105 à 125 ch),
- 3 à 4 tracteurs avec bennes suivent l'ensileuse en parallèle, selon la distance des parcelles au silo et la taille des bennes,
- un tracteur avec chargeur frontal au silo pour étaler l'herbe et la tasser.

Tableau E26 : Chantiers d'ensilage réalisés avec une récolteuse hacheuse et chargeuse à couteaux pour la Plaine des Cafres et la Plaine des Palmistes

chantiers (n=8)	surface (ha)	teneur en MS (%)	quantité de MS (t)			coût (F)		
			total	par ha	par benne	total	par ha	par t MS
somme	19.0		62.9			46504		
moyenne pondérée		25		3.3	0.91		2448	739

Une comparaison par le CEMAGREF (Gaillard *et al.*, 1989b) fait état de coûts de récolte très inférieurs à ceux de La Réunion : 1467 F ha⁻¹ pour 50 ha récoltés annuellement avec une ensileuse à couteaux, tractée, et 1313 F ha⁻¹ pour 50 ha récoltés annuellement en balles enrubannées. Les conditions difficiles de récolte (parcellaire, pente, chemins d'accès ...), l'usure des matériels qui en résulte, et l'apport nécessaire de mélasse (de 350 à 750 F ha⁻¹ selon le fourrage) sont en grande partie responsables de cette différence importante.

Coût d'un stock fourrager constitué par du foin de *Chloris gayana*

Une comparaison de l'ensilage des fourrages produits sur l'exploitation, avec l'achat de foin à l'extérieur a été réalisée avec les hypothèses suivantes (figures E9 et E10) :

- la valeur alimentaire des fourrages produits dans les Hauts (kikuyu, dactyle, ray-grass, fétuque, brome) est assez variable de 0.6 à 0.8 UFL kg⁻¹ MS,
- le foin produit dans les Bas, *Chloris gayana*, est récolté le plus souvent au stade épiaison (valeur nutritive de 0.5 à 0.6 UFL kg⁻¹ MS) avec une teneur en MS de 80 % (75 à 85 %),
- le prix de vente de ce foin en balles parallélépipédiques (15 à 30 kg) ou en grosses balles cylindriques (150 à 300 kg) varie de 1.30 à 1.80 F kg⁻¹.

Le coût du foin livré chez l'éleveur (80 % de MS, 0.55 UFL kg⁻¹ MS et 1.50 F kg⁻¹) est de 3.40 F UFL⁻¹, ce qui correspond à un coût d'ensilage de 2400 F t⁻¹ MS (figures E9 et E10). En prenant en compte la totalité des coûts de production fourragère (867 F t⁻¹ MS), le coût d'opportunité, par rapport au foin, de la récolte d'ensilage serait de 1533 F t⁻¹ MS. Seulement 8 chantiers (Hauts de l'Ouest et Plaine des Cafres), sur les 39 suivis en 1990 et 1991, ont présenté un tel coût (Paillat *et al.*, 1990 ; Lepetit *et al.*, 1992). En réalité, les coûts fixes restent présents sur l'exploitation, même pour une alimentation à base de foin. Si l'on ne retient donc que les coûts variables de production fourragère (453 F t⁻¹ MS), le coût d'opportunité, par rapport au foin, de la réalisation d'ensilage devient 1947 F t⁻¹ MS, ce qui n'a jamais été atteint.

Ces comparaisons sommaires n'ont pas pour but de bannir l'utilisation du foin dans les rations de bovins, mais de montrer que l'ensilage d'herbe est une technique qui a sa place dans les systèmes fourragers des Hauts. En effet, celui-ci, à condition qu'il soit de bonne qualité, valorise les surfaces fourragères et permet une intensification à un coût compétitif, d'où l'importance du choix des fourrages, des parcelles et de la technique de récolte. Le foin, aux prix pratiqués actuellement, doit, quant à lui, être utilisé à bon escient, c'est à dire pour améliorer des rations trop pauvres en MS et ainsi favoriser la rumination. Cet apport devrait être plus particulièrement recommandé en période estivale humide et pour l'alimentation des jeunes génisses (âge < 6 mois). Une sous-utilisation des surfaces fourragères de l'exploitation, avec achat de foin pour constituer des stocks importants pour la période hivernale, serait vraisemblablement une erreur économique.

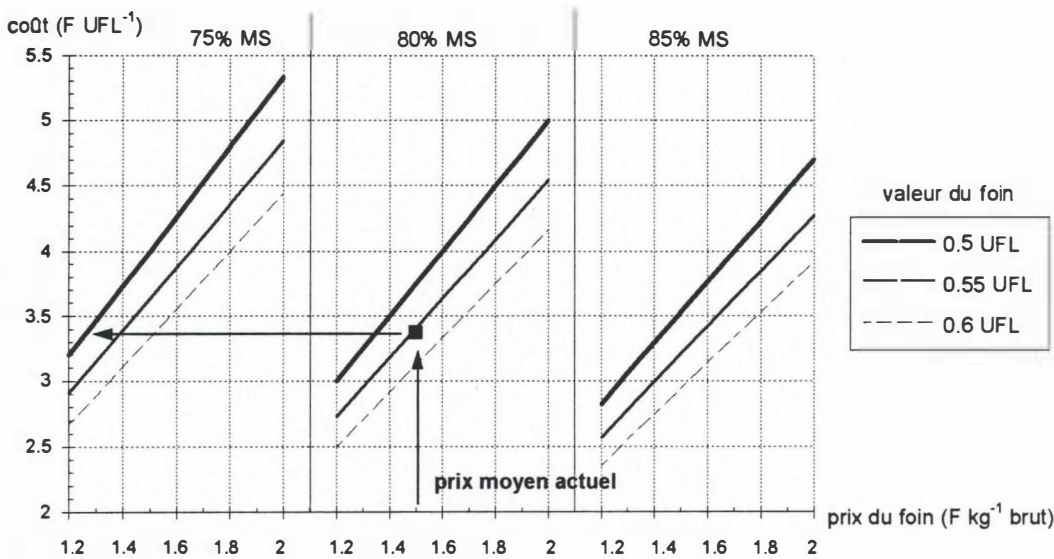


Figure E9 : Détermination du coût du foin dans une ration pour vaches laitières selon sa teneur en MS, sa valeur nutritive et son prix d'achat

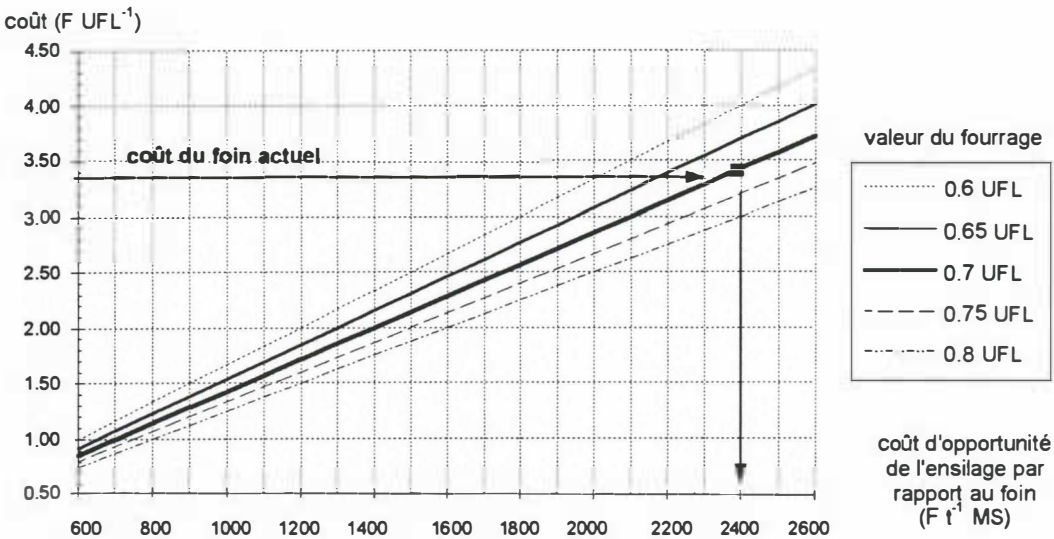


Figure E10 : Détermination du coût d'opportunité de l'ensilage d'herbe par rapport au foin dans une ration pour vaches laitières selon la valeur nutritive du fourrage

Abstract

The upland livestock systems on Réunion Island require fodder storage in the form of grass silage to offset shortage during the winter (cool dry season). This work aims to study silage in wrapped bales made by the livestock farmers, and addresses several aspects : suitability of the fodder species for silage, drying conditions, testing of stretchwrap films in tropical conditions, keeping quality, and cost.

The water soluble carbohydrates content of fodder is low, except in spring, while buffer capacity is moderate. Addition of sugar cane molasses is required. The fodder species and the regional climatic conditions are factors in the drying process, which can be optimized by harvesting at the right stage in forage maturity with a moderate yield, as well as by correct adjustment of machinery. Requirements for the stretch film to be used are demanding, on account of tropical conditions (temperatures) or altitude (UV radiation) : one type of film has been selected and is in use. Improvements in certification procedures for stretchwrap films, based on measurement of air-tightness, have also been suggested.

It has been shown that DM content is the main factor in preservation. Threshold levels have been established at 27 % minimum DM content for temperate grass species and 40 % for kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*). Addition of soluble sugars considerably improves fermentation characteristics, but fermentation is satisfactory only from the DM levels quoted above. Similarly, the addition of lactic acid bacteria and enzymes improves fermentation, again with the restriction concerning DM content, and providing there is an adequate amount of water soluble carbohydrates. The addition of ammonium tetraformate has proved to be detrimental to acidification and does not improve fermentation. The comparison with other silage techniques in use has demonstrated the superior quality of silage in wrapped bales (75 % were satisfactorily preserved), this being mainly connected with the higher DM content, and better air-tightness than in silage clamps.

The labour contribution by farmers to harvest operations reduced cost and considerably decreased outlay. The machinery used, determined by terrain and the fodder species being harvested, affects costs, which are very variable from one area to another. The costs of silage-making, with different techniques, and assessed in similar conditions, are comparable.

Since 1990, wrapped silage bales have developed fast in Réunion Island. They at present account for 50 % of the silage harvested (300 ha), and concern nearly all livestock farms making silage, about 50 % of the dairy farmers. Silage in wrapped bales contributes to addressing the need for better management of fodder crops.

Key-words :

Wrapped round bales silage - Fodder natural drying - Fermentation -

Silage storage - Sugar cane molasses - Lactic acid bacteria - Stretchwrap film -

Air-tightness - Labour time requirements - Costs

Résumé

Les systèmes d'élevage des Hauts de l'île de La Réunion nécessitent des reports de fourrage sous forme d'ensilage d'herbe pour combler le déficit fourrager hivernal (saison sèche et fraîche). Ce travail a pour objectif l'étude de l'ensilage en balles enrubannées réalisé par les éleveurs. Plusieurs aspects sont pris en compte : aptitude des fourrages à l'ensilage, conditions de dessiccation, tests des films étirables en conditions tropicales, qualité de conservation et coût de revient des ensilages.

La teneur en glucides solubles des fourrages est faible, sauf au printemps ; par contre leur résistance à l'acidification est plutôt modérée. Un apport de mélasses de canne à sucre est nécessaire. L'espèce fourragère et les conditions climatiques régionales conditionnent la dessiccation qui peut être optimisée par une meilleure maîtrise du stade et du rendement fourrager, ainsi que par un réglage adéquat des machines. Les films étirables sont soumis à des conditions difficiles liées aux expositions tropicales (températures) ou d'altitude (rayonnement UV) : un film a été retenu et son utilisation est vulgarisée. Des améliorations de la méthode de certification des films, basée sur la mesure d'étanchéité, sont également proposées.

Il apparaît que la teneur en MS est le principal facteur de conservation. Des seuils sont établis : teneur minimale de 27 % pour les graminées tempérées et de 40 % pour le kikuyu (*Pennisetum clandestinum*). L'apport de sucres solubles améliore les caractéristiques de fermentation, mais celles-ci ne deviennent satisfaisantes que pour les teneurs en MS minimales précitées. De même, l'apport de ferments biologiques améliore les caractéristiques de fermentation, avec les mêmes restrictions quant à la teneur en MS, si la quantité de glucides solubles est suffisante. L'apport de tétraformiate d'ammonium s'est avéré néfaste à l'acidification et n'a pas amélioré les caractéristiques de fermentation. La comparaison avec les autres techniques d'ensilage utilisées a montré la meilleure qualité des ensilages en balles enrubannées (75 % sont bien conservés), liée principalement à une teneur en MS plus élevée et à une étanchéité meilleure que celle des silos.

La participation des éleveurs à diverses opérations de récolte permet de réduire les coûts de revient et surtout de limiter les sorties d'argent. Les conditions de mécanisation, liées à la topographie et à l'espèce fourragère récoltée, déterminent le niveau des coûts (très variable selon les régions). Les coûts d'ensilages, réalisés avec différentes techniques et évalués dans des mêmes conditions, sont comparables.

Depuis 1990, la technique d'ensilage en balles enrubannées s'est rapidement développée à La Réunion. Elle représente actuellement environ 50 % des ensilages réalisés (300 ha) et concerne presque tous les élevages réalisant des ensilages, soit environ 50 % des éleveurs laitiers. L'ensilage en balles enrubannées répond à la nécessité de mieux gérer les surfaces fourragères.

Mots-clés :

Balles rondes enrubannées - Dessiccation du fourrage - Fermentations - Conservation - Mélasses de canne - Ferments biologiques - Film étirable - Etanchéité - Temps de travaux - Coût de revient